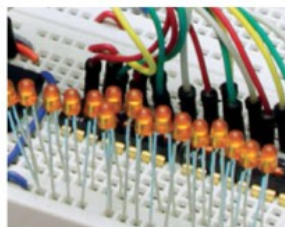
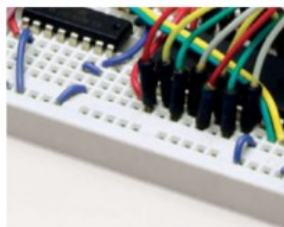
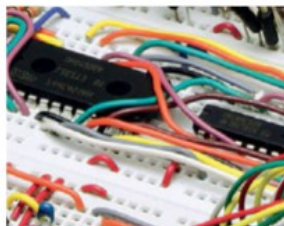
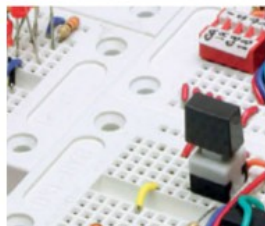
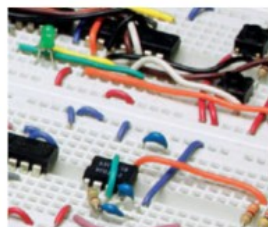
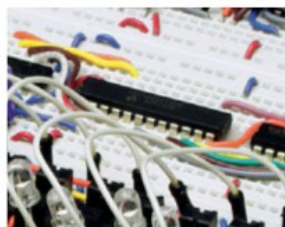
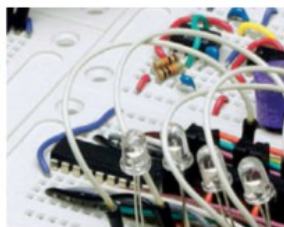
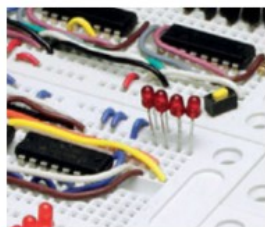
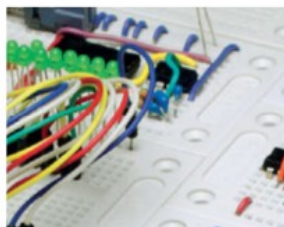
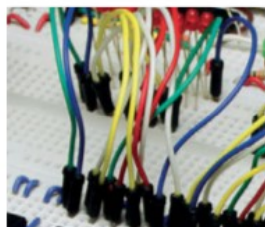


L'ÉLECTRONIQUE EN PRATIQUE 2

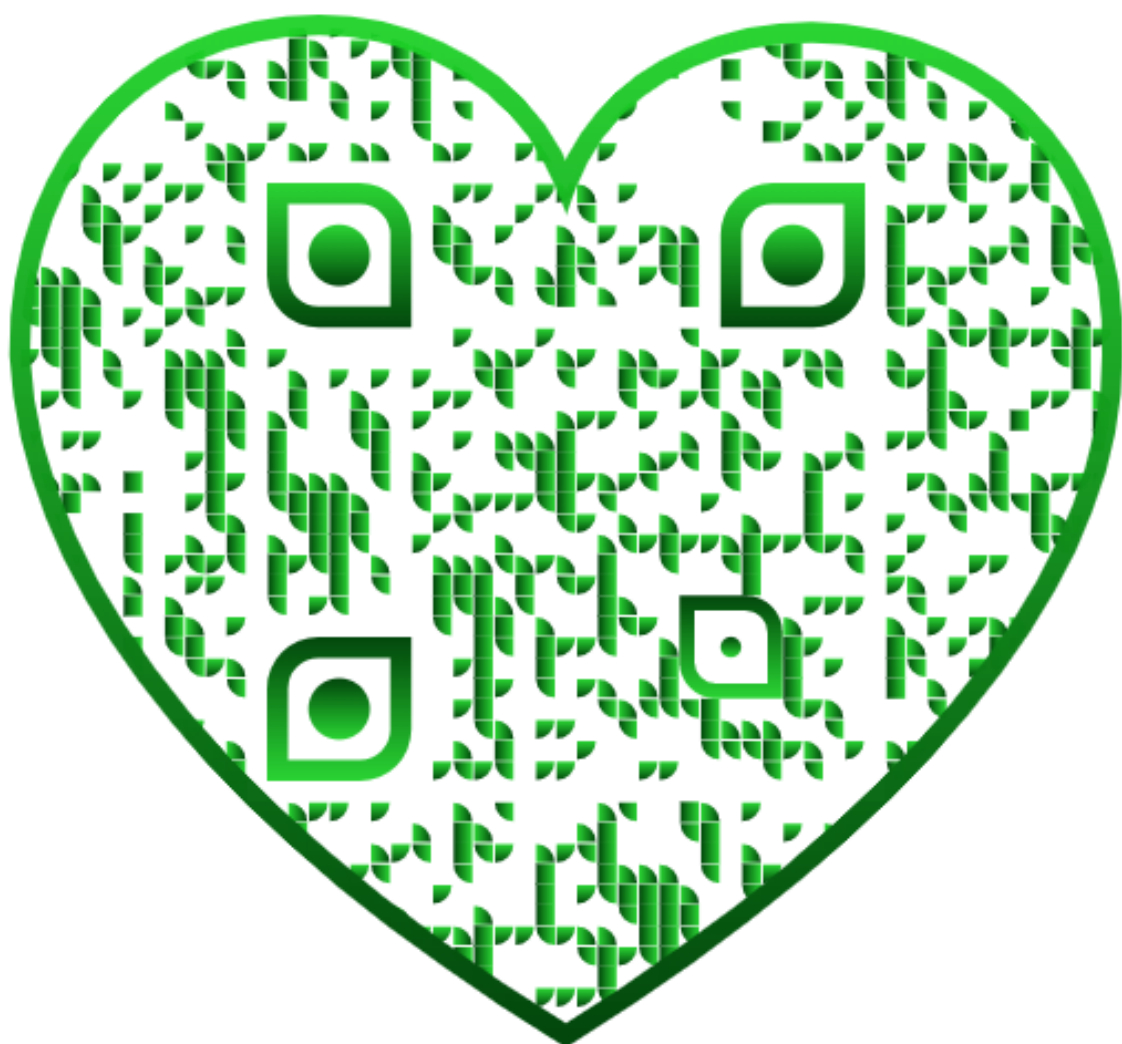
36 expériences ludiques

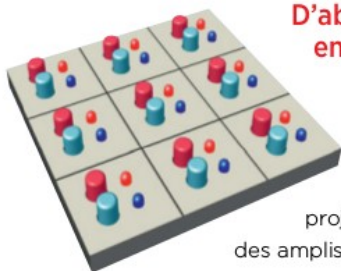
Charles
Platt



EYROLLES

SERIAL
MAKERS





D'abord, on pratique, ensuite on explique !

L'électronique ne se résume pas qu'à des résistances, des condensateurs, des transistors et des diodes.

Savez-vous qu'il existe une infinité de projets faisant appel à des comparateurs, des amplis-op ou encore des capteurs ?

Après le best-seller *L'électronique en pratique* de Charles Platt, lisez la suite du même auteur pour vous en convaincre. Grâce à 36 nouvelles expériences, cet ouvrage vous emmènera à la découverte d'une multitude de composants : amplis-op, comparateurs, compteurs, encodeurs, décodeurs, multiplexeurs, registres à décalage, bargraphes, timers, réseaux Darlington, phototransistors...

À qui s'adresse ce livre ?

- Aux électroniciens en herbe, amateurs, bricoleurs, bidouilleurs, geeks, étudiants, musiciens...
- À tous les makers qui souhaitent approfondir leurs connaissances en électronique.

Dans ce livre, vous apprendrez à :

- mettre au point un testeur de télépathie avec des portes NAND, NOR et XNOR
 - construire un contestataire de bruit avec des amplis-op et des condensateurs de liaison
 - créer une version électronique du *Yi Jing* avec un décodeur et un compteur binaire
 - fabriquer un jeu de la fente magique avec un timer, un compteur et un multiplexeur
-

Charles Platt est un passionné d'électronique depuis son enfance. Auteur de plusieurs ouvrages de science-fiction, il a enseigné le graphisme, puis est devenu l'un des principaux rédacteurs du magazine *Wired*.

Aujourd'hui, il contribue régulièrement à la revue américaine *Make*, bien connue de la communauté des makers.

Make:
makezine.com

L'électronique en pratique

2

Charles Platt

avec les photos et illustrations de l'auteur

EYROLLES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bld Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Authorized French translation of the English edition of *Make: More Electronics* ISBN 978-1-449-34404-7 © 2014 Helpful Corporation. This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls all rights to sell the same.

Traduction autorisée de l'ouvrage en langue anglaise intitulé *Make: More Electronics* de Charles Platt (ISBN : 978-1-449-34404-7), publié par Maker Media, Inc.

Adapté de l'anglais par Jean Boyer

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Charles Platt pour les photos et illustrations de la présente édition

© Groupe Eyrolles, 2015, pour la présente édition, ISBN : 978-2-212-14179-5

*À la mémoire de mon père, Maurice Platt, qui m'a montré
que le métier d'ingénieur était un beau métier enrichissant.*

Remerciements

À l'époque des tubes à vide, j'ai découvert l'électronique avec mes camarades d'école. Nous étions « geeks » avant même que ne soit inventé le mot. Patrick Fagg, Hugh Levinson, Graham Rogers et John Witty m'ont alors montré quelques possibilités. Cinquante ans plus tard, Graham a bien voulu contribuer à la réalisation de ce livre.

C'est Mark Frauenfelder qui m'a poussé à prendre l'habitude de créer. Gareth Branwyn m'a aidé à écrire *L'Électronique en pratique* et Brian Jepson en a permis la suite. Ce sont les trois meilleurs éditeurs que j'ai connus et ils sont aussi trois de mes très bons amis. La plupart des auteurs n'ont pas cette chance.

Je suis également reconnaissant envers Dale Dougherty fondateur, président et « Chief Executive Officer » de Maker Media Inc. à Sebastopol (Californie) pour avoir

initié ce mouvement que je n'avais jamais imaginé devenir si important, et pour m'avoir accueilli comme contributeur.

Fredrik Jansson m'a conseillé et corrigé lorsque je travaillais à ce projet. Sa patience et sa bonne humeur m'ont été précieuses.

La vérification du contenu a été assurée par Philipp Marek. Ne critiquons pas Philipp ou Frederik si des erreurs subsistent dans ce livre. Rappelons-nous qu'il est plus facile pour moi de commettre une erreur qu'à d'autres de la trouver.

Les circuits ont été réalisés et testés par Frank Teng et A. Golin, leur aide fut appréciée.

Je remercie également Kara Ebrahim et Kristen Brown du département production pour leur consciencieuse attention, ainsi qu'Amanda Kersey, correctrice.

Avant-propos

Ce livre se situe précisément où mon précédent ouvrage *L'Électronique en pratique* s'arrêtait. Vous allez retrouver ici des thèmes que je n'avais pas pu aborder en détail dans le premier tome, et en découvrir d'autres totalement nouveaux qui n'avaient pas été traités par manque de place.

Vous remarquerez également que j'approfondis les aspects techniques dans ce livre, afin d'offrir une meilleure compréhension des concepts. J'ai cependant essayé de rendre cet « apprentissage par la découverte » le plus distrayant possible.

Quelques-uns des sujets traités ici ont fait l'objet d'articles dans le magazine américain *Make*. J'ai toujours beaucoup de plaisir à écrire dans cette revue, mais le format imposé par ce type de publication limite l'importance des explications et le nombre des illustrations. En revanche, je peux dans cet ouvrage couvrir de façon plus exhaustive et plus intelligible les thèmes abordés.

J'ai choisi de ne pas développer ici les microcontrôleurs : expliquer leur mise en œuvre et leurs langages de programmation de manière précise exigerait beaucoup trop de place. D'autres ouvrages se chargent de décrire les familles de microcontrôleurs. Je proposerai dans ce livre différentes façons de recréer ou de simplifier les projets étudiés en utilisant des microcontrôleurs, mais je vous laisserai le soin de continuer en ce sens par vous-même.

De quoi aurez-vous besoin ?

Connaissances préalables

Vous devrez avoir de bonnes connaissances de base des sujets couverts dans le livre précédent, à savoir tension, courant, résistance, loi d'Ohm, condensateurs, inter-

rupteurs, soudure, utilisation des plaques de montage sans soudure et portes logiques. Bien entendu, libre à vous d'acquérir ces notions à partir d'autres ouvrages d'introduction à l'électronique. Mais si vous avez lu *L'Électronique en pratique* et que vous en avez retenu l'essentiel, vous avez peut-être oublié quelques notions spécifiques, aussi je rappellerai rapidement quelques principes, mais sans les réexpliquer en détail.

Outillage

Je suppose que vous disposez déjà des équipements suivants qui ont tous été décrits dans *L'Électronique en pratique* :

- multimètre ;
- fil de câblage de section 0,22 mm² (75 cm de chaque couleur avec un minimum de 4 couleurs) ;
- pince à dénuder ;
- pinces plates ;
- fer à souder et fil à souder décapant ;
- platine de montage (selon le type préféré décrit ci-après) ;
- pile de 9 V ou une alimentation à courant continu pouvant délivrer entre 9 V DC et 12 V DC sous une intensité de 1 A.

Composants

Dans l'annexe située en fin d'ouvrage, j'ai mentionné tous les composants dont vous aurez besoin pour réaliser les différents projets. Vous y trouverez également la liste des principaux fournisseurs de matériel électronique en France.

Fiches techniques

J'ai déjà évoqué les fiches techniques dans *L'Électronique en pratique*, je ne peux cependant éviter de rappeler combien ces fiches sont essentielles. N'hésitez pas à vous y référer avant d'utiliser un composant pour la première fois.

Si vous recherchez une référence via un moteur de recherche traditionnel, vous trouverez probablement une demi-douzaine de sites proposant la visualisation de leurs fiches techniques. Ces sites sont organisés pour leur profit et non pour vous être agréable. Vous devrez donc probablement cliquer de façon répétitive pour avoir accès à chaque page de caractéristiques, chaque site vous soumettant autant de publicités que possible.

Vous gagnerez du temps en cherchant une référence sur le site de son fournisseur comme <http://www.mouser.fr> : vous aurez alors la possibilité de visualiser l'ensemble de sa fiche technique sous forme d'un document PDF. Cela sera plus facile à lire et à imprimer.

Comment utiliser cet ouvrage ?

Il existe quelques différences notables dans le style et l'organisation de ce livre par rapport au précédent.

Schémas

Dans *L'Électronique en pratique*, les schémas étaient tracés « à l'ancienne », utilisant des croisements pontés partout où une connexion croisait une autre sans s'y relier. J'avais utilisé cette représentation car elle réduisait le risque de commettre des erreurs dues à une mauvaise interprétation du circuit. Ici, comme mes lecteurs ont désormais suffisamment de pratique pour bien lire les schémas, il était plus important de se conformer aux règles les plus communément utilisées. Examinez la fig. 1 pour comprendre.

Par ailleurs, comme dans *L'Électronique en pratique*, j'ai utilisé la convention européenne pour éliminer les décimales dans les valeurs des composants. Ainsi, les valeurs 3,3 K et 4,7 K sont représentées respectivement par 3K3 et 4K7. Je préfère toujours cette écriture car les virgules décimales sont toujours difficiles à identifier dans un document de mauvaise qualité.

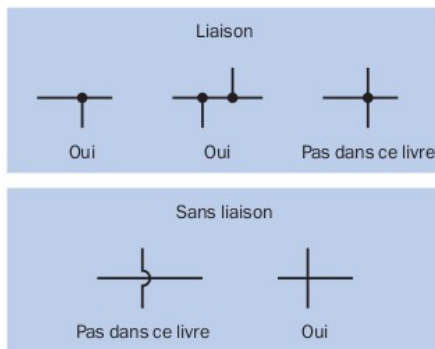


Figure 1. En haut : dans tous les schémas de ce livre, les conducteurs reliés électriquement le seront par un point noir. Toutefois, on évitera le dessin de droite, car il ressemble trop à un pont où il n'y a pas de connexion entre les conducteurs. En bas : pour symboliser des conducteurs qui se croisent sans connexion électrique, on utilisera ici le dessin de droite, plus courant.

Dimensions

Les circuits intégrés (et bien d'autres composants) comportent habituellement des fils de connexion, également nommés « broches », qui sont insérés dans des trous des circuits imprimés. Ces fils, sur les composants dits « traversants », espacés par un intervalle d'un dixième de pouce (0,1", soit 2,54 mm), sont faciles à saisir entre vos doigts.

La vision idyllique de compatibilité universelle à l'échelle humaine a été brouillée par l'arrivée du système métrique. Certains fabricants sont ainsi passés d'un espace standard entre broches de 2,54 mm à 2 mm, gênant alors ceux qui utilisent des plaques de circuits perforées à 2,54 mm (0,1"). Autre cas de figure où les millimètres se sont imposés, l'incontournable LED utilisée comme voyant possède le plus souvent un diamètre de 5 mm. Or c'est un peu trop grand pour un trou de 3/16", mais pas assez pour se loger dans un perçage de 13/64".

Ce livre, dont l'édition originale est américaine, utilise de préférence les pouces, mais l'équivalence en unités métriques est également indiquée lorsque cela s'avère nécessaire. Pour votre information, deux tables de conversion millimètres/fractions de pouces sont disponibles dans l'ouvrage *L'Électronique en pratique*, pages 125 et 126.

Un problème plus important provient du fait que l'intégralité de l'industrie électronique utilise maintenant la technologie des composants montés en surface. Au lieu d'un espacement de 0,1» entre fils, il n'y a plus de fils ou broches mais des plots à souder, et un composant a souvent une largeur de 2,54 mm, voire moins. Pour réaliser un circuit à partir de ces composants, il est nécessaire de recourir à des pinces miniatures (pinces à épiler), un microscope et un fer à souder spécifique, ce qui est faisable, mais personnellement, je ne trouve pas cela agréable. C'est pourquoi vous ne trouverez aucun projet dans ce livre utilisant des composants montés en surface.

Calculs mathématiques

Même si vous ne rencontrerez pas beaucoup de calculs dans ce livre, il est important que vous les compreniez.

J'ai choisi d'utiliser une notation habituellement employée en programmation. L'astérisque (*) symbolise la multiplication, tandis que le slash (/) est utilisé comme symbole de la division. Lorsque des opérations seront placées entre parenthèses, vous devrez les effectuer en premier dans vos calculs. Lorsque des parenthèses seront incluses dans d'autres parenthèses, celles placées les plus à l'intérieur seront prioritaires. Par exemple :

$$A = 30 / (7 + (4 * 2))$$

Ici, vous devez commencer par multiplier 4 par 2 pour obtenir 8, puis ajouter 7 au résultat ce qui donne 15, que vous utiliserez comme diviseur de la valeur 30. En conclusion, A vaut 2.

Organisation

Contrairement au livre précédent, celui-ci a une structure de base linéaire, principalement pour être plus en adéquation avec l'utilisation des matériels de lecture portatifs (ordinateurs, tablettes ou liseuses) qui ne s'accroissent guère de la quantité et de la variété des détails qui pourraient être répartis sur une double page imprimée. J'espère que vous lirez cet ouvrage du début jusqu'à la fin, au lieu de sauter de section en section.

Le premier projet établit les concepts qui seront ensuite utilisés dans le second montage. Celui-ci pose les bases utilisées dans le troisième projet, et ainsi de suite. Si vous ne suivez pas cette progression, vous irez donc au devant de certaines difficultés.

Vous trouverez cinq principaux types de sections dans ce livre, identifiées par leur titre.

- **Expériences** : ce sont les travaux pratiques. Ils représentent le principal fil conducteur de cet ouvrage.
- **En bref** : lorsque j'introduirai un nouveau concept, je récapitulerai souvent les notions à mémoriser pour une utilisation future.
- **Fondamentaux** : il s'agit de brèves digressions au cours desquelles je fournirai des informations supplémentaires qui me semblent intéressantes ou utiles, même si elles ne sont pas strictement indispensables pour réaliser un projet. Après un bref aperçu, je vous laisserai vous informer davantage sur le sujet par vous-même.
- **Pour aller plus loin** : comme je n'ai pas assez de place dans ce livre pour décrire en détail toutes les variantes d'un projet, je citerai ici quelques déclinaisons possibles.
- **Attention** : de temps en temps, je signalerai des actions à éviter, car elles pourraient conduire à des erreurs gênantes, nuire à vos composants, ou plus rarement représenter un danger pour votre personne.

Si quelque chose ne fonctionne pas

Il y a en général une seule façon de réaliser un circuit qui soit fonctionnel, alors qu'il en existe des centaines conduisant à des erreurs l'empêchant de fonctionner. La chance est souvent contre vous, à moins que vous ne procédiez très attentivement et méthodiquement. Je sais combien il est frustrant quand les composants assemblés ne réalisent pas ce que l'on attend d'eux, mais si vous rencontrez un problème, vous devriez déceler la plupart des erreurs commises en suivant ces instructions.

1. Reliez le fil noir de votre multimètre, réglé pour la mesure des tensions continues, au pôle négatif de la source d'alimentation (sauf si l'expérience précise une autre méthode). Assurez-vous que votre circuit soit mis en marche. Reliez alors le fil rouge de votre multimètre en divers points du câblage de votre circuit pour déterminer la présence éventuelle de tensions erronées ou absentes.

2. Vérifiez avec attention que tous les fils de liaison aboutissent exactement là où ils doivent se situer sur la plaque de montage.

Lors de l'utilisation d'une platine de montage, deux erreurs reviennent très souvent : l'insertion d'un fil de liaison une rangée avant ou après celle où il devrait se situer, et le positionnement de deux composants ou connexions adjacents sur la même rangée, alors que la liaison interne à la plaque d'essai va les court-circuiter. La fig. 2 présente ces deux erreurs. Assurez-vous que vous les avez bien assimilées !

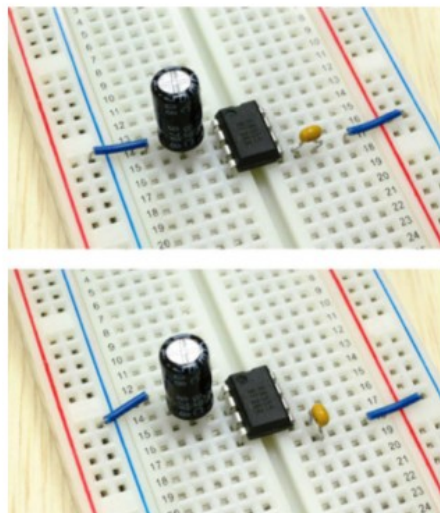


Figure 2. Les deux erreurs les plus fréquemment commises sur une plaque de montage (en haut), et corrigées (en bas).

Sur la photo du haut, les fils du condensateur électrochimique sont insérés entre les rangées 13 et 15 de la plaque, mais comme ils sont cachés dans cette vue, il est facile de placer par erreur une extrémité du fil bleu dans la rangée 14. Sur la droite, la broche 5 du composant est supposée être découplée (mise à la masse) par un condensateur céramique. Or, tous les trous d'une même rangée étant reliés, le condensateur est court-circuité et le composant est relié directement à la masse. La photo du bas montre les erreurs corrigées.

Si l'alimentation est correctement appliquée à votre circuit, et si les composants et les fils de liaison sont correctement positionnés sur la plaque de montage,

cinq autres points doivent être vérifiés en cas de dysfonctionnement.

Orientation des composants

Les boîtiers des circuits intégrés doivent être enfilés fermement dans la plaque. Vérifiez qu'aucune broche ne soit pliée, sous le composant ou vers l'extérieur, et donc non insérée ou mal enfilée dans la plaque de montage.

Les diodes et les condensateurs polarisés doivent être correctement positionnés.

Mauvaises connexions

Parfois (c'est rare mais cela arrive), un composant peut être mal connecté à la plaque de montage. S'il fonctionne par intermittence de façon inexplicable, ou si la tension est nulle, essayez de réinsérer les composants. Selon mon expérience, ce problème se produira plutôt si vous utilisez une plaque d'essai de mauvaise qualité, peu coûteuse, ou si vous utilisez des fils de connexion de section inférieure à 0,2 mm².

Valeurs des composants

Vérifiez que toutes les valeurs des résistances et des condensateurs sont correctes. Ma façon de procéder consiste à contrôler à l'aide du multimètre la valeur de chaque résistance avant de la mettre en place. Cela prend du temps mais peut permettre d'en gagner sur le long terme. J'en reparlerai plus loin.

Détériorations

Les circuits intégrés et les transistors peuvent avoir été endommagés par des tensions inappropriées, une polarité incorrecte ou par l'électricité statique. Gardez des pièces de rechange que vous pourrez ainsi utiliser en remplacement.

Fatigue

Quand tout échoue, faites une pause ! Travailler de manière obsessionnelle pendant de longues périodes peut réduire votre champ visuel vous empêchant de voir ce qui ne va pas. Si vous portez votre attention vers quelque chose de différent pendant quelques instants, et si vous revenez à votre problème ensuite, la solution peut soudainement apparaître évidente.

Pour aller plus loin

Une fois que vous aurez réalisé tous les projets de ce livre, je pense que vous aurez acquis de solides connaissances en électronique. Mais ne vous attendez pas à un troisième tome, car je ne suis pas assez compétent pour écrire un ouvrage encore plus avancé !

Si vous souhaitez approfondir vos connaissances, penchez-vous sur les sujets que je n'ai pas traités dans cet ouvrage, à savoir la théorie de l'électronique, ainsi que la conception et le test des circuits. Si vous concevez un circuit vous-même, vous devez en comprendre le principe, en prévoir le comportement et avoir la possibilité de le vérifier après l'avoir réalisé. Pour cela, vous aurez besoin d'un oscilloscope et de logiciels de simulation de circuits. Vous trouverez une liste de logiciels gratuits sur Wikipédia. Certains de ces simulateurs vous indiquent le fonctionnement des circuits numériques digitaux, d'autres sont spécialisés dans les circuits analogiques, certains couvrent les deux. Ces sujets vont toutefois bien au-delà de l'objectif d'un livre de vulgarisation et sont probablement éloignés de la vision que la plupart des personnes ont de l'électronique, qu'elles considèrent plutôt comme un hobby et non comme un métier.

Si vous souhaitez étudier davantage la théorie électronique, je vous recommande le livre *Practical Electronics for Inventors* de Paul Scherz (McGraw-Hill, 2013). Rassurez-vous, vous n'avez nullement besoin d'être un inventeur pour le trouver utile.

J'ai toujours pensé qu'il existait un besoin pour une encyclopédie des composants électroniques. Je me suis souvent demandé pourquoi un tel ouvrage n'existait pas, alors j'ai décidé d'en écrire un moi-même.

Le premier volume de mon ouvrage *Encyclopedia of Electronic Components* est maintenant disponible en anglais. Deux autres volumes suivront pour un total de trois. Alors que *L'Électronique en pratique* est un manuel d'enseignement par l'expérience, le format encyclopédique permet un accès rapide à l'information. Il est également plus technique et écrit dans un style moins agréable pour le lecteur mais conduisant directement au sujet. Personnellement, je pense qu'une encyclopédie des composants offre un moyen inestimable de se remémorer les propriétés et applications de tous les composants que vous pourriez être amené à utiliser.

Bonne lecture !

Table des matières

Introduction	1	4 Mesure de la lumière	27
Source d'alimentation	1	Utilisation des phototransistors	28
Régulation	1	En bref : les phototransistors	28
Prototypage	2	Fondamentaux : photons et électrons	28
Câblage	3	En bref : le 555	28
Grippe-fils	5	En bref : les circuits CMOS et bipolaires	31
Rangement des composants	6	5 Un son effrayant	33
Vérifications	7	Pour aller plus loin	34
1 La colle résistante	9	6 Marche-arrêt simple et sûr	37
Un amplificateur à base de colle	9	Comparaisons	37
Que se passe-t-il ?	10	En bref : les comparateurs	38
Représentation d'un transistor NPN	11	La réaction	38
Attention : brochages non standards	11	L'hystérésis	39
Fondamentaux : conducteurs et isolants	12	Le symbole	41
Pour aller plus loin	12	En bref : les signes + et -	41
2 Relevé de valeurs	13	La sortie	41
Prérequis	13	En bref : plus d'infos sur les comparateurs	42
Comportement des transistors	13	À l'intérieur du circuit intégré	43
Attention : multimètre en danger !	16	Le circuit redessiné	43
Abréviations et fiches techniques	16	Attention : comparateurs inversés	44
Tension et amplification en courant	17	Comparaison avec un microcontrôleur	44
En bref : les tensions	20	Pour aller plus loin : système de sécurité basé sur un laser	45
Pour aller plus loin : mesures à l'ancienne	20	7 Interrupteur chronophotonique	47
En bref : les transistors	21	Attention : évitez les tensions dangereuses	47
Réponses concernant l'exemple du diviseur de tension	21		
3 De la lumière au son	23		
Tonalité audio photosensible	23		

Principe du circuit	48	Fondamentaux : origines de la contre-réaction négative	80
Test du circuit	50	Repousser les limites	80
Détails concernant le relais	50	No pain, no gain !	81
Condensateur de liaison	50	Phase 1 : tensions de sortie	82
Découvrez l'intérieur d'un réveil	51	Phase 2 : tensions d'entrée	82
Attention : pas de réveil branché sur le secteur !	51	Phase 3 : le tracé	84
Observez l'intérieur	51	Phase 4 : le gain	84
Alimentation du réveil	52	Est-ce correct ?	85
Comment retentit-il ?	53	Réduire les écarts	86
Utilisez le son produit	54	Les circuits de base	86
Connectez le réveil	56	Circuits de base sans alimentation symétrique	87
Comment cela devrait fonctionner	56	En bref : les amplificateurs opérationnels	89
Tests	57		
Connexion du relais à la lampe	58		
Attention : prudence avec le secteur électrique	58		
Pour aller plus loin	59		
Et maintenant ?	59		
8 Aventures sonores	61	12 Un amplificateur fonctionnel	91
Amplifiez	61	Le circuit intégré 386	91
Présentation de l'électret	61	Le circuit amplificateur	92
M'entendez-vous ?	62	Recherche de dysfonctionnement	93
Fondamentaux : l'essentiel sur les microphones	63		
Les hauts et les bas sonores	64		
9 Des millivolts aux volts	67	13 Parlez doucement	95
Mise en place d'un condensateur	67	Fondamentaux : l'histoire de Widlar	95
Présentation de l'amplificateur opérationnel	68	Pas à pas	95
Quelle est la différence ?	68	Détection	96
Une paire parfaite	69	Cela fonctionnera-t-il ?	96
		Fondamentaux : translation de tension	98
		Suite du contestataire de bruit	99
		Question de puissance	101
		Échec ?	102
		Encore un détail	102
10 Du son à la lumière	73	14 Une contestation réussie	105
Combinaison LED-transistor	73	Tout est dans le timing	105
La LED ne s'allume pas	74	Résumé des modifications	107
La LED s'illumine en permanence	74	Le test au bruit	108
La LED clignote régulièrement	74	Pour aller plus loin	108
		Est-ce réalisable avec un microcontrôleur ?	109
		Et après ?	109
11 Le besoin de négation	75	15 C'est tellement plus logique !	111
Mesures perturbantes	75	Test de télépathie	111
Amplification en courant continu	75		
Les secrets de l'amplification	76		
Stimulant électronique	79		
Gain	79		

Fondamentaux : PES	111
Préparation	111
En bref : les circuits logiques	113
La logique PES	114
Réalisation	114
Améliorations	116
16 Testeur de télépathie amélioré!	117
Êtes-vous prêt?	117
Révélez la tricherie	118
Indiquez l'échec	118
Les conflits	118
Démêlez l'affaire	119
Traduisez le graphique	119
Optimisation	121
Réalisation	122
Détails	125
La différence numérique	125
Faites encore mieux	125
Pas si simple?	126
Peut-on utiliser un microcontrôleur?	126
17 Pierre, Feuille, Ciseaux! ..	127
Histoire de probabilités	127
Fondamentaux : la théorie des jeux	128
La logique	128
Lequel est activé?	129
Qui triche?	130
Fondamentaux : les réseaux de portes logiques	130
18 Place aux interrupteurs... 133	133
Fondamentaux : une porte XNOR faite d'interrupteurs d'éclairage	133
Revenez au jeu	133
Identifiez l'interrupteur	135
Prévenez la tricherie	136
Match nul	138
Câblage	138
Câblage antitriche	142
Conclusion	142
19 Décoder la télépathie..... 145	145
Test du décodeur	145
Rappel sur le système binaire	148
Câblage	148
Brochage du décodeur	150
20 Décoder Pierre, Feuille, Ciseaux..... 153	153
La logique	153
Spécifications	154
Un circuit OR indisponible	154
Sauvé par un NOR	155
Réalisez la version simplifiée	156
Pour aller plus loin	159
Décodage	159
21 La fente magique..... 161	161
Multiplexez	161
Déplacez vos liaisons	162
En bref : les multiplexeurs	162
Brochage du multiplexeur	163
Applications des multiplexeurs	163
Comparaison entre multiplexeur analogique et digital	164
En bref : les différentes sortes de multiplexeurs-démultiplexeurs	165
Conception du jeu	165
Comptage des fentes	166
Conception du circuit	167
Réalisez la platine de jeu	169
Test de la fente magique	169
Qui gagne?	170
Les gains	170
Expliquer les probabilités	171
Fondamentaux : les autres configurations du jeu	172
Et avec un microcontrôleur?	172
22 Logiquement audible..... 173	173
Fondamentaux : le théremine	173
Audiophonie logique	173
XOR audible	173
Tout se mélange	174

23 Un projet casse-tête 177

Fondamentaux : le roi anglais des énigmes	177
Déplacements de pions	177
La grille logique	178
Utilisez des circuits logiques	179
Le jeu d'Ovide commuté	180
Pour aller plus loin	181
Solution de l'énigme	182

24 Additionnez 183

Les cinq règles du calcul binaire	183
Des bits aux états logiques	184
Fondamentaux : l'option NAND	186
Votre petit additionneur personnel	187
Câblage de l'additionneur	187

25 Améliorez votre additionneur 191

Le retour du décodeur	191
Entrée par dipswitchs	192
Présentation d'un encodeur	193
Autres fonctions d'un encodeur	193
Fondamentaux : la puissance du système binaire	194
Fondamentaux : réalisez votre encodage	194
Pour aller plus loin : autres alternatives d'entrée	195
Et des interrupteurs ?	195
Pour aller plus loin : additionneur binaire à interrupteurs	195
Remplissez un tableau	196
Description des interrupteurs	196
Pour aller plus loin : autres possibilités	197

26 Faites tourner les anneaux 199

Démonstration de l'anneau	199
Attention : incompatibilités entre temporisateurs	199
Brochage peu pratique	199
En bref : les barrettes de connexion	201
En bref : les compteurs en anneau	201

Réalisez un jeu	202
Fonctions additionnelles	203
Réglage final du jeu	204
Pour aller plus loin	205
Utiliser un microcontrôleur	206

27 Décalage des bits 207

Pas de rebonds !	207
Spécificités	207
Démonstration du décalage des bits	208
En bref : les registres à décalage	210
Brochage	210
Fondamentaux : les trains d'impulsions	210
Applications modernes	211

28 Le Yi Jing électronique 213

Les hexagrammes	213
L'affichage	214
La voie directe et les tiges	214
Les nombres	215
Échantillons aléatoires	216
Comportement du montage	217
Précisions	218
Barres lumineuses ou LED	218
Réalisation du Yi Jing électronique	220
Assemblage et vérifications	223
Utilisation du Yi Jing électronique	223
Réalisation finale	224

29 Les capteurs usuels 225

L'interrupteur magnétique miniature	225
Test d'un interrupteur Reed	226
Fonctionnement	226
Capteur de niveau	227
Jauge de carburant	227
En bref : les interrupteurs magnétiques	228
Substitution facile	229
Installation d'un interrupteur magnétique	229
Fondamentaux : la polarité magnétique	230
Types d'aimants et approvisionnement	230
Formes des aimants	230
Pour aller plus loin : les courants de Foucault	232
Attention : dangers des aimants	233

30 Les capteurs masqués . . . 235

Test d'un capteur à effet Hall	235
Applications	237
En bref : les capteurs à effet Hall	238
Types de capteurs	238
Idées d'utilisation	239
Pour aller plus loin : jeu de lancer de billes miniature	239
Pliage du plastique	240
Le circuit électronique	241

31 L'optique électronique . . . 243

Les capteurs de lumière actifs	243
Attention : mort lente des capteurs !	244
Quelques chiffres	245
Test d'un capteur infrarouge	245
Test de la LED infrarouge	246
Test du phototransistor	247
Test logique	247
Variantes	247
En bref : les capteurs optiques transmissifs	248
Les fentes magiques améliorées	248
Validation du concept	248
Schéma	250
Réalisation	251
Le coffret	252

32 Améliorez le jeu d'Ovide . . 255

L'option logique	255
Commutez à nouveau	256
Problèmes magnétiques	257
Pour aller plus loin : utilisation d'un microcontrôleur	258

33 Détection des rotations . . 259

Définition d'un encodeur rotatif	259
Spécifications	259
Train d'impulsions	260
Attention : encodeurs de mauvaise qualité	260
À l'intérieur d'un encodeur	260
Utilisation des encodeurs	261
Rendez cela aléatoire	262
Décideur rotatif	262

Non-décideur rotationnel	263
Hasard renforcé	265

34 Contrôle du milieu ambiant 267

Un timer commandé par un autre	267
Contrôle de la température	268
Facteurs aléatoires	269
Automatisation du circuit de randomisation	269
Fondamentaux : limitation du comptage	270
Réglage de la vitesse	271
En bref : les thermistances	271
Rendre une thermistance plus aléatoire	272
Le capteur d'humidité	272
Contrôle de l'humidité	272
L'accéléromètre	273
Le capteur tactile	273
Les problèmes de l'empirisme	274
L'aléatoire est-il aléatoire ?	274

35 Le registre à décalage à rétroaction linéaire 277

Connaître votre LFSR	277
En bref : au sujet du registre à décalage à rétroaction linéaire	278
Observez de près le décalage de bits	279
Le problème des zéros	280
La nécessité de non-répétition	280
Attention : singularité des portes XNOR	282
Déroulez le test	283
Les uns et les zéros	284
Problème de pondération	285
Sautez la valeur 254	285
Partagez l'entrée d'horloge	286
Y a-t-il d'autres possibilités ?	286
Valeur de départ	286
Pour aller plus loin : autres jeux et autres nombres	287
LED clignotantes	287
Sélection d'une fente	287
Variante du compteur en anneau	287
Tonalités aléatoires	288
Contrôle du Yi Jing électronique	289

Pour aller plus loin : randomisation par microcontrôleur	289
---	-----

36 Le degré de paranormalité d'un individu 291

Derniers diagrammes logiques	291
Abordons la seconde partie	292
Logique d'entrée	293
Le signal « prêt »	293
Initialisation aléatoire	293
Deux portes XOR additionnelles	294
Le timing explique tout	294
Comptage de toutes les tentatives	296

Schéma de la seconde partie	296
Test du testeur	298
Quelle est l'imprévisibilité de la perception extrasensorielle ?	299
La puissance du triangle	300
Les probabilités de John Walker	300

Conclusion 303

Annexe Principaux fournisseurs et liste du matériel 305

Index 331

Introduction

Dans *L'Électronique en pratique*, j'avais émis quelques suggestions à propos de l'espace de travail, des composants et des outils, entre autres choses. Certains de ces conseils doivent maintenant être revus, tandis que d'autres vont être répétés ou développés.

Source d'alimentation

La plupart des circuits de ce livre peuvent être alimentés par une pile de 9 volts, qui a l'avantage d'être non seulement économique mais aussi une source de tension stable sans parasite ni bruit. Cependant, la tension d'une pile diminue notablement au cours de son utilisation et peut varier, d'un instant à l'autre, selon l'intensité qu'elle doit fournir. Disposer d'une alimentation variable, capable de délivrer une tension de 0 V à 20 V en courant continu (20 V DC), voire plus, est un réel avantage mais pourrait coûter plus que vous ne souhaitez dépenser. Un compromis raisonnable pourrait être l'achat d'un bloc alimentation secteur délivrant une tension unique de 12 V, facilement transformable en 9 V DC ou 5 V DC à l'aide d'un régulateur de tension, afin d'alimenter la plupart des expériences de ce livre. Un régulateur de tension coûte moins d'1 € et un bloc alimentation capable de fournir un courant continu de 1 A (1000 mA), environ 10 €, le tout restant économique.

Vous pourriez être tenté de choisir un chargeur de téléphone portable, particulièrement si vous en avez un inutilisé, le téléphone étant hors d'usage. La plupart de ces chargeurs délivrent une tension de 5 V DC ce qui ne conviendrait pas pour les projets nécessitant 9 V DC. De plus, étant destinés à la charge des batteries, leur tension de sortie est parfois réduite quand leur charge absorbée augmente.

En définitive, si vous avez un budget réduit et n'envisagez pas de construire des versions permanentes de certains projets, une pile de 9 V fera l'affaire. Dans le cas contraire, investissez dans un bloc secteur économique délivrant une tension de 12 V.

Régulation

De nombreuses expériences nécessitent une tension continue régulée de 5 V DC. Pour cela, vous aurez besoin des composants suivants :

- régulateur de tension LM7805 ;
- condensateurs en céramique de 0,33 μ F et 0,1 μ F ;
- résistance de 2K2 ;
- interrupteur de type SPST ou SPDT de type traversant, pour circuit imprimé, dont les broches pourront s'insérer dans les trous de la plaque de montage ;
- diode LED ordinaire.

La fig. I-1 page suivante montre comment ces composants peuvent être insérés dans la partie haute d'une platine de montage, créant un bus positif à gauche et un bus négatif à droite de la platine, ce qui correspond à la configuration que j'utiliserai dans la plupart des projets.

La pile de 9 V utilisée ici peut bien évidemment être remplacée par un bloc secteur. Assurez-vous que ce bloc délivre une tension continue de 7 V DC minimum. Afin d'éviter de générer des pertes calorifiques excessives, il ne devrait pas dispenser une tension supérieure à 12 V DC.

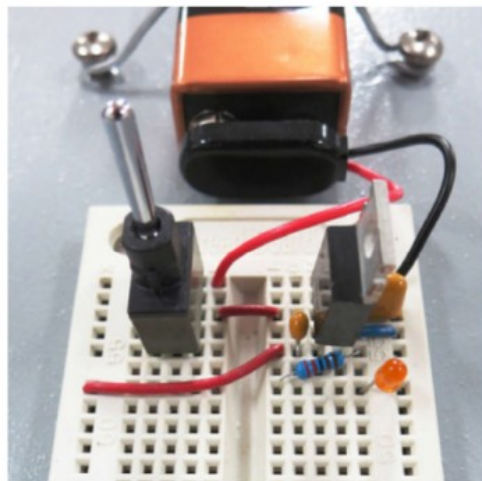


Figure I-1. Placement des composants permettant de générer une tension continue régulée de 5V.

La fig. I-2 présente le schéma de ce circuit. Les condensateurs devront être utilisés même si une pile alimente le montage, ils garantissent un fonctionnement correct du régulateur de tension.

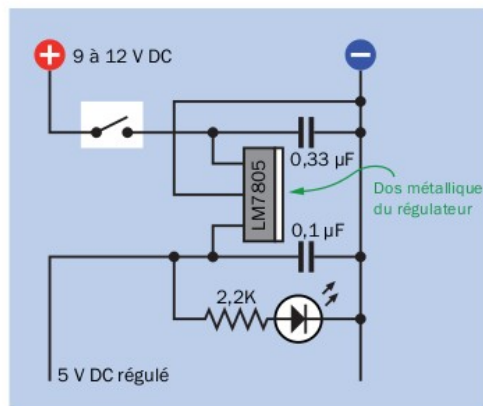


Figure I-2. Schéma de l'alimentation régulée 5V continu.

Je suggère que vous ajoutiez un interrupteur et une diode LED ce qui est plus pratique. Si votre circuit ne fonctionne pas, il est intéressant de vérifier l'allumage de la LED, confirmant ainsi que le montage est bien

alimenté. De plus, lorsque vous devrez modifier le circuit d'un projet, vous apprécierez de pouvoir couper puis remettre l'alimentation sans difficulté. J'ai placé une résistance de valeur relativement élevée en série avec la diode LED afin d'économiser la pile dans le cas où vous en utiliseriez une.

Prototypage

Dans *L'Électronique en pratique*, j'utilisais des plaques de montage ayant un bus d'alimentation sur chacun des ses côtés les plus longs, vous aviez ainsi les lignes alimentation négatives et positives des deux côtés de la plaque.

Dans ce livre, j'ai décidé d'utiliser un modèle de platine plus simple, présentant une seule ligne d'alimentation de chaque côté tel que montré sur la fig. I-3.

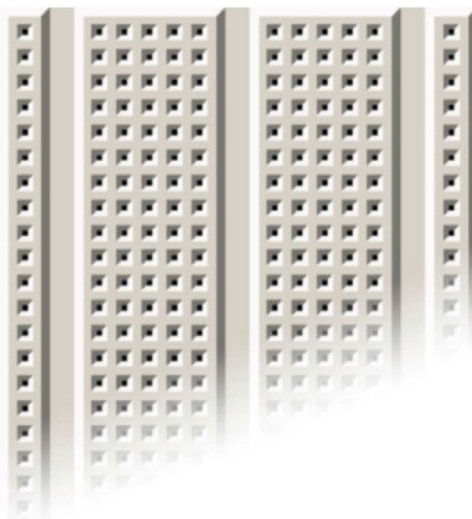


Figure I-3. Apparence extérieure d'une platine ne possédant qu'une seule ligne d'alimentation de chaque côté. Tous les circuits de ce livre seront définis pour ce type de plaque.

Plusieurs raisons justifient ce changement.

- Les platines de ce type sont beaucoup plus économiques, particulièrement si vous les achetez directement en Asie via eBay. Ne soyez pas déconcerté par les noms de ces vendeurs, tels que « hero-

fengstore » ou « kunkunh ». À l'heure de parution de ce livre, vous pouvez vous procurer ces plaques pour quelques euros seulement, si vous n'êtes pas découragé par la durée d'acheminement, parfois de plusieurs semaines. Pour plus de conseils en ce qui concerne l'approvisionnement de composants, reportez-vous à l'annexe de l'ouvrage.

Si vous achetez plusieurs platines de montage, vous pourrez conserver les circuits précédents sur leurs plaques alors que vous en utiliserez une neuve pour chaque nouveau circuit.

- Si vous souhaitez réaliser une version permanente d'un circuit en soudant ses composants sur un circuit imprimé, le plus simple serait d'utiliser des plaques d'essai à souder en époxy ou bakélite ayant des pistes de même configuration que celle des plaques de montage sans soudures.

Ces types de plaques ont la plupart du temps une seule ligne de bus de chaque côté (la référence SYB-120 60x12 est une plaque d'essais à une seule ligne d'alimentation comportant 600 points, correspondant à celle utilisée dans les expériences de cet ouvrage. Elle peut être commandée en ligne pour quelques euros).

Ainsi, si la configuration est identique, le transfert des composants à partir de la platine de montage sans soudure sera facilité.

- Les retours d'expérience des lecteurs m'ont appris qu'ils avaient tendance à commettre plus d'erreurs en utilisant des plaques de montage avec double bus d'alimentation sur chaque côté. Ces erreurs peuvent être coûteuses et gênantes, certains composants n'ayant pas une grande tolérance à l'inversion de polarité.

Il est important que vous ayez en tête une image des connexions internes de la platine utilisée, c'est pourquoi je présente à nouveau une image du précédent livre. La fig. I-4 est une vue en écorché de la plaque d'essai.

Rappelez-vous que de nombreuses platines de montage ont des bus d'alimentation interrompus en plusieurs points autorisant ainsi l'utilisation de sources de tension différentes selon les endroits de la plaque. Je n'ai pas l'intention de recourir à cette possibilité, et je vous conseille, lorsque vous utilisez une nouvelle plaque, de vérifier avec un multimètre si les lignes d'alimentation ne sont pas interrompues. Dans le cas

contraire, vous devrez recourir à un fil pour ponter chaque coupure. Si vous oubliez cette précaution, votre circuit pourrait ne pas fonctionner.

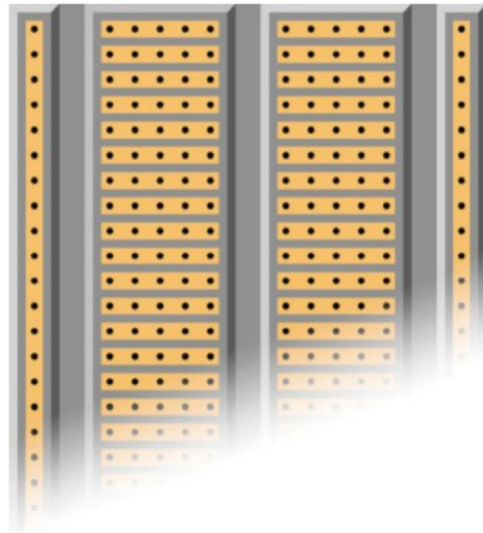


Figure I-4. Vue écorchée montrant les conducteurs internes d'une plaque de montage.

Câblage

De temps en temps, je reçois un e-mail d'un lecteur, accompagné d'une photo montrant un circuit conçu sur une plaque de montage, ne fonctionnant pas, et me demandant pourquoi. Si le lecteur a utilisé des fils souples possédant un petit embout à chaque extrémité, ma réponse est toujours la même : je ne peux pas vous aider car, même si j'avais le circuit face à moi, je ne serais toujours pas en mesure de proposer une autre recommandation que de retirer tous les fils et de réaliser à nouveau le câblage.

Les fils d'interconnexion pour les plaques d'essai sont faciles et rapides à connecter, j'ai souvent succombé à leur attrait mais je l'ai souvent regretté car, si vous faites une seule erreur, vous aurez beaucoup de difficulté à la repérer au milieu de cet enchevêtrement de fils.

Dans la plupart des photos de ce livre, vous remarquerez que j'utilise des fils de liaison flexibles avec embouts pour réaliser les connexions avec l'extérieur de la platine utilisée. En revanche, sur la plaque, j'utilise des petits fils rigides, dénudés à chaque extrémité. Il est infiniment plus aisé de trouver une erreur en utilisant ce type de fils.

Si vous achetez des kits de fils rigides prédécoupés, vous verrez qu'ils sont colorés en fonction de leur longueur. Or, ce n'est pas très pratique ; il serait préférable d'utiliser une couleur de fil en rapport avec sa fonction. Par exemple, une connexion aboutissant à la ligne d'alimentation positive du bus doit être rouge, peu importe sa longueur. Deux fils placés parallèles seront de couleurs différentes et contrastées afin de ne pas les confondre. Et ainsi de suite. De cette façon, je peux observer une plaque, rapidement déterminer son fonctionnement et trouver une erreur de câblage plus aisément.

Peut-être pensez-vous que prédécouper vous-même vos fils est trop fastidieux. En ce cas, j'ai une suggestion à vous faire. La fig. I-5 montre la méthode que j'utilise pour préparer mes fils de liaison.

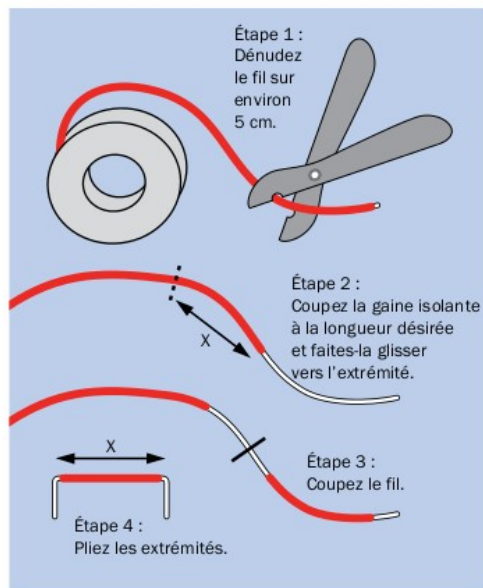


Figure I-5. Une façon simple de créer des fils de liaison pour une plaque de montage.

Commencez par retirer une petite longueur d'isolant (environ 5 cm) et jetez-la. Ensuite, estimez la distance que votre fil doit couvrir sur la plaque. Appelons « X » cette distance. Reportez cette longueur sur l'isolant du fil comme à l'étape 2 et placez votre pince à dénuder à l'endroit du pointillé. Poussez ensuite la gaine isolante du fil vers l'extrémité du fil à environ 1 cm de cette extrémité. Coupez ensuite le fil au niveau de la ligne noire continue. Pliez les extrémités pour terminer.

Afin de trier et ranger les fils ainsi prédécoupés, vous pouvez réaliser un calibre de longueur de fil. Cet outil sera également utile pour plier les fils à la longueur désirée. Il s'agit simplement d'un morceau de plastique ou de contreplaqué de forme triangulaire avec des découpes en escalier le long de la diagonale, comme indiqué sur les fig. I-6 et I-7.

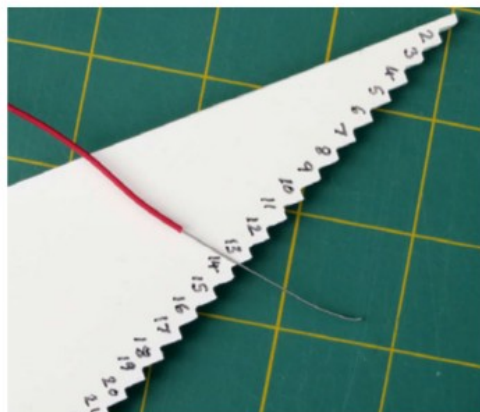


Figure I-6. Calibre fait maison pour plier et trier les fils utilisés sur les plaques d'essai (gradué en pas de 2,54 mm).

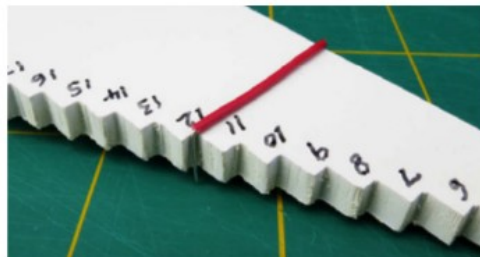


Figure I-7. Vérification d'un fil de longueur 28 mm (1,1", soit 11 pas) à l'aide du calibre.

Notez que pour prendre en compte l'épaisseur du fil lors du pliage, les créneaux du calibre devront être découpés en réduisant leur longueur d'1,6 mm environ. Une autre méthode pour vérifier la longueur des fils pliés consiste à utiliser une plaque de circuit imprimé perforé au pas de 2,54 mm (0,1").

Rappelez-vous que les trous d'une plaque d'essai sont espacés de 2,54 mm (0,1" ou un pas élémentaire), verticalement et horizontalement, l'espace plein au centre de la platine ayant une largeur de 3 pas soit 7,62 mm. En ce qui concerne le diamètre des fils à utiliser, la section de 0,2 mm² (calibre USA AWG24) est de loin le meilleur choix. Un diamètre inférieur (calibre USA AWG26) n'assurerait pas de bons contacts alors qu'un diamètre supérieur (calibre USA AWG22) serait difficile à insérer.

Vous pourrez trouver des lots de fils sur eBay. Personnellement, j'utilise des fils de dix couleurs différentes : rouge, orange, jaune, vert, bleu (plusieurs teintes bleues), noir, marron, violet, gris et blanc. Si vous êtes rigoureux et affectez une couleur à chaque connexion sur la platine en fonction de sa fonction, vous simplifierez beaucoup votre travail.

Jetez à nouveau un œil à la fig. 2 page 2, pour vous remémorer les deux causes d'erreurs de câblage les plus fréquentes. Vous pensez peut-être que vous ne ferez jamais de telles erreurs de câblage, mais je les ai moi-même commises lorsque j'étais fatigué ou quand j'avais travaillé au-delà du raisonnable.

Grippe-fils

Dans *L'Électronique en pratique*, j'ai évoqué des mini grippe-fils que vous pouvez enficher sur les cordons d'un multimètre. Ils sont parfois difficiles à trouver mais un large choix de grippe-fils et de cordons de mesure répondant à l'objectif recherché est disponible par exemple chez Selectronic. La fig. I-8 montre un grippe-fil noir inséré sur une pointe de touche de multimètre, le rouge étant déconnecté. Cette configuration est, selon moi, un bon compromis. Vous pouvez ainsi accrocher le grippe-fil noir à un fil de masse quelconque dans votre circuit et utiliser la pointe de touche rouge pour vérifier vos tensions aux différents points du circuit. Ces grippe-fils réalisent une excellente liaison avec les conducteurs, ils ne devraient pas entraîner de perturbation, apportant tout au plus une résistance d'un ou deux ohms aux connexions.



Figure I-8. Grippe-fils permettant aux pointes de touche de votre multimètre de s'accrocher à une connexion, vous évitant de devoir tenir les pointes de touche en place.

La fig. I-9 illustre le mécanisme d'un grippe-fil lorsqu'il est en position ouverte, le ressort le ramenant en position accrochée étant poussé. Sur la fig. I-10, le ressort est relâché permettant au grippe-fil de s'accrocher au fil d'une résistance.



Figure I-9. Grippe-fil ayant son crochet ouvert en poussant le ressort de maintien.



Figure I-10. En relâchant le ressort, le grippe-fil exerce une pression ferme sur un fil de résistance.

On peut également utiliser des cordons munis de pinces crocodiles à chaque extrémité (voir la fig. I-11) comme autre solution, un cordon avec pince crocodile étant relié à une pointe de touche, l'autre pointe de touche étant utilisée pour vérifier différents points du circuit. J'en reparlerai plus loin dans ce livre lorsque vous aurez besoin d'avoir une main libre non occupée à maintenir un cordon de mesure sur un fil. Personnellement, je pense que les grippe-fils sont plus adéquats mais si vous ne souhaitez pas encombrer en permanence vos pointes de touche, le cordon à deux pinces crocodiles est une alternative.



Figure I-11. Ce type de cordon possédant une pince crocodile à chaque extrémité peut être utilisé comme alternative, reliant une extrémité à une pointe de touche, l'autre étant reliée au circuit en cours de vérification.

Vous pouvez également vous procurer des cordons possédant un grippe-fil à chaque extrémité comme ceux de la fig. I-12. Vous en trouverez par exemple chez Selectronic sous l'appellation « Cordon grippe-fil » référence 14.9003-10.



Figure I-12. Cordon ayant un grippe-fil à chaque extrémité, utile là où une pince crocodile pourrait provoquer un court-circuit avec un conducteur voisin.

Ces cordons présentent l'avantage d'être munis de grippe-fils plus petits que les pinces crocodiles qui, sur des connexions rapprochées, pourraient toucher un conducteur voisin et provoquer ainsi un court-circuit.

Rangement des composants

Pour le stockage des condensateurs, la taille réduite des condensateurs céramiques multicouches rend mes recommandations du livre *L'Électronique en pratique* dépassées. Les petits composants se rangent plus facilement dans de petites boîtes, comme celles qu'utilisent les passionnés de la création de bijoux.

Les magasins spécialisés en loisirs créatifs proposent toutes sortes de boîtes de rangement de perles comme celles de la fig. I-13. Les condensateurs céramiques se répartissent facilement dans celles-ci à couvercle vissé d'environ 2,5 cm de diamètre. Cela me permet de garder toutes les valeurs de base (0,01 μF et supérieures) à portée de mains sur ma table, dans une boîte d'à peine 20 cm de côté. Par ailleurs, il est important que chaque récipient se ferme par un couvercle vissé, afin d'éviter que les condensateurs se répandent sur le sol et se mélangent en cas de chute accidentelle. Les condensateurs se ressemblent tous, il serait donc fastidieux de devoir à nouveau les trier.



Figure I-13. Les condensateurs céramiques récents sont si petits qu'une boîte à perles est idéale pour leur rangement.

En ce qui concerne les résistances, je suggère de réduire la longueur de leurs fils, ainsi elles pourront également être entreposées dans des petits récipients. Il est rare en effet d'utiliser la longueur totale des fils des résistances et si cela s'avère parfois nécessaire, il est plus judicieux

d'avoir recours à un fil de liaison isolé sur la plaque de montage. La fig. I-14 montre une solution pour ranger les résistances des 30 valeurs les plus usuelles. Comme pour les condensateurs, cela évite que les résistances ne se dispersent si vous bousculez la boîte. Chaque compartiment peut recevoir environ 50 résistances (voir la fig. I-15).



Figure I-14. Une boîte à perles légèrement plus grande convient pour les résistances si leurs fils sont réduits en longueur.



Figure I-15. Cinquante résistances peuvent être rangées dans ces petits flacons.

Vérifications

Lorsque je construis un circuit, j'essaie de vérifier régulièrement la valeur de chaque composant, résistance ou condensateur, avant de le placer sur la plaque. Un condensateur céramique de 10 μF et un autre de 0,1 μF apparaissent presque identiques, deux résistances de valeurs 1K et 1M également, à l'exception d'une bande de couleur différente. Si des valeurs de composants sont mélangées, vous vous retrouverez face à des erreurs de fonctionnement qui vous laisseront perplexes.

Afin de simplifier la vérification des résistances, j'utilise une petite platine d'essai avec des fils reliés aux cordons de mesure d'un multimètre à calibre automatique comme le montre la fig. I-16. Il ne me reste alors qu'à insérer chaque résistance dans la plaque, la vérification prenant ainsi moins de 5 secondes. La plaque de montage n'ajoutant que quelques ohms à la valeur de la résistance ne perturbe généralement pas la vérification qui ne nécessite pas la connaissance précise de la valeur. Je dois juste être sûr de ne pas commettre une erreur significative. Pour la même raison, le multimètre le moins cher conviendra parfaitement à cette opération.



Figure I-16. Vérification simple des valeurs des résistances avant de les utiliser dans un projet.

J'en ai fini avec cette introduction, entrons maintenant dans le vif du sujet en passant aux expériences !

La colle résistante

Je souhaite commencer par une expérience simple et amusante, car je pense que l'électronique devrait toujours comporter une part récréative.

Pour ce montage, je vais utiliser de la colle et du carton. Je suis bien conscient que ces matériaux ne sont pas couramment utilisés dans les livres d'électronique, mais ils vont nous permettre d'aborder deux sujets. En premier lieu, cela va nous rappeler que l'électricité ne se limite pas qu'à des fils et des cartes. Deuxièmement, cette expérience va nous conduire à la connaissance détaillée du composant le plus vital et fondamental qu'est le transistor bipolaire. Enfin, cela va nous mener à une discussion au sujet des ions, de la résistance électrique et de la résistivité.

Je pense que si vous avez lu *L'Électronique en pratique*, vous avez déjà appris les bases du fonctionnement des transistors, mais, après une petite récapitulation, j'irai au-delà de leur principe de fonctionnement.

Pour rappel, vous trouverez la liste des composants nécessaires à chaque expérience dans l'annexe de cet ouvrage.

Un amplificateur à base de colle

La fig. 1-1 présente le plan de la réalisation. Le carton sert de support au circuit, vous n'utiliserez pas de plaque de montage pour ce projet. Commencez par enfoncer les fils du transistor dans le carton. Le transistor 2N2222 est commercialisé sous deux versions, l'une avec une encapsulation métallique, l'autre avec un enrobage en plastique noir. Si vous utilisez le type métallique, l'ergot métallique devra se situer à gauche selon l'orientation de la figure. Si vous utilisez le type en plastique noir, le 2N2222 ou PN2222, le côté plat devra se trouver à

droite – mais si vous avez acheté la variante P2PN2222 (souvent mentionnée comme équivalente des autres références), vous devrez placer le côté plat à gauche. Contrôlez la référence avec une loupe et vérifiez dans le paragraphe « Symbologie » si vous n'êtes pas sûr.

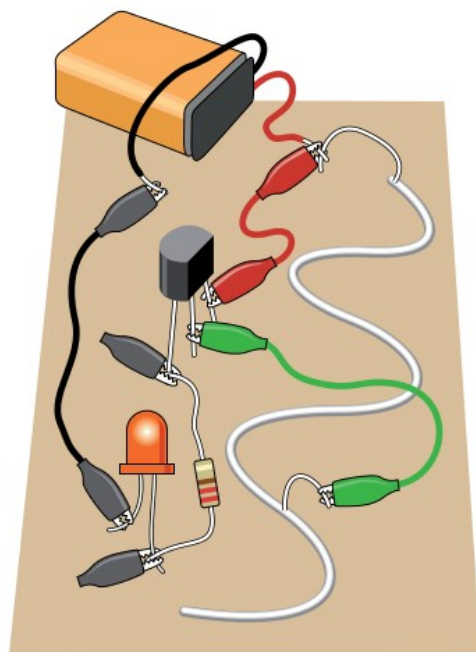


Figure 1-1. Pour votre première expérience, vous avez besoin d'un transistor, d'une résistance de 220Ω, d'une pile de 9 V, de cordons de liaison, de fils de câblage, de colle blanche et de carton.

Reliez les composants comme indiqué. Le fil le plus long de la diode LED est à droite et le fil court à gauche. La résistance reliée au fil le plus long de la LED a une valeur de 220 Ω . Prenez garde à ce que les pinces crocodiles ne se touchent pas entre elles au niveau de leurs liaisons aux fils du transistor. Maintenant utilisez votre flacon de colle blanche liquide (la colle Elmer est recommandée pour cette expérience) pour réaliser une trace de colle en zigzag d'environ 30 cm de long et de 3 mm de large. Déposez la colle du haut vers le bas tel qu'indiqué sur la fig. 1-2. Prenez soin de ne pas interrompre le filet de colle.

Pourquoi la colle Elmer est-elle conseillée ? Simplement parce qu'il s'agit d'une colle courante qui possède les caractéristiques électriques souhaitées pour cette expérience. Ce n'est pas un isolant mais ce n'est pas non plus un bon conducteur électrique. Toutefois, une autre colle blanche devrait permettre d'obtenir des résultats comparables.

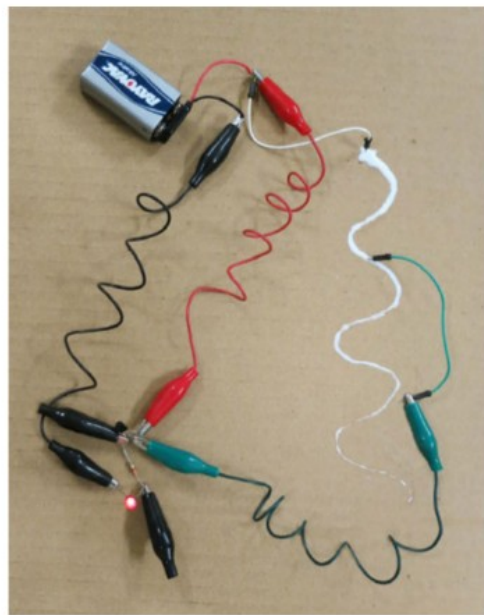


Figure 1-2. Le circuit en action, au cas où vous doutiez de son fonctionnement.

Vous devez agir rapidement avant que la colle ne sèche. Prenez le fil vert (connecté au fil central du transistor) et touchez le trait de colle en son milieu. La LED

devrait s'illuminer vivement. Maintenant, touchez le trait de colle à son extrémité en bas, la LED devrait alors s'allumer avec une luminosité plus faible.

Si vous avez lu mon précédent ouvrage, vous aurez deviné pourquoi – mais je vais vous le réexpliquer ici.

Que se passe-t-il ?

Le trait de colle que vous avez tracé doit avoir une résistance totale d'environ 1 mégohm, communément appelé mégohm (du haut vers le bas du trait) soit environ 4K par cm. Si vous voulez vérifier avec votre multimètre, utilisez un morceau de fil pour rallonger les cordons de mesure afin de ne pas enduire ces derniers de colle.

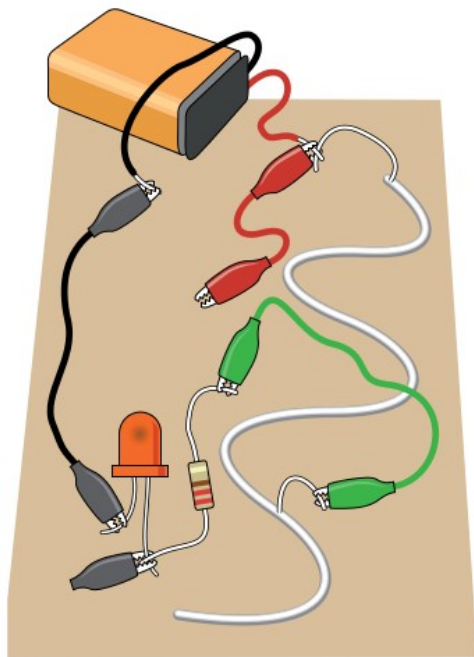


Figure 1-3. Lorsque le transistor n'amplifie pas le courant traversant la LED, la résistance de la colle est trop forte pour fournir assez d'intensité pour l'allumer.

Le transistor agit comme un amplificateur. Il augmente le courant traversant sa base (le fil central). La sortie amplifiée est disponible à son émetteur (fil de gauche sur la fig. 1-1). Dans cette expérience, le courant de base

du transistor a été réduit en le faisant passer à travers le trait de colle qui a une résistance importante. La LED réagit en fonction du courant qui la traverse et montre ainsi ce qui se passe en faisant varier son intensité lumineuse.

Pour avoir une impression visuelle de la façon dont le transistor agit, retirez-le du circuit selon la fig. 1-3 ci-contre. La pince crocodile verte doit maintenant être reliée avec la résistance reliée en série avec la LED, celle-ci doit rester éteinte. La résistance de la colle est si élevée que l'intensité traversant la LED est trop faible pour provoquer son allumage. Si vous déplacez la pince crocodile verte en haut du trait de colle à environ 5 mm de l'extrémité où est relié le pôle positif de la pile, la LED devrait s'illuminer faiblement.

Représentation d'un transistor NPN

Si vous avez des difficultés pour vous souvenir du symbole d'un transistor NPN et du brochage du composant utilisé, reportez-vous à la fig. 1-4 pour vous le rappeler.

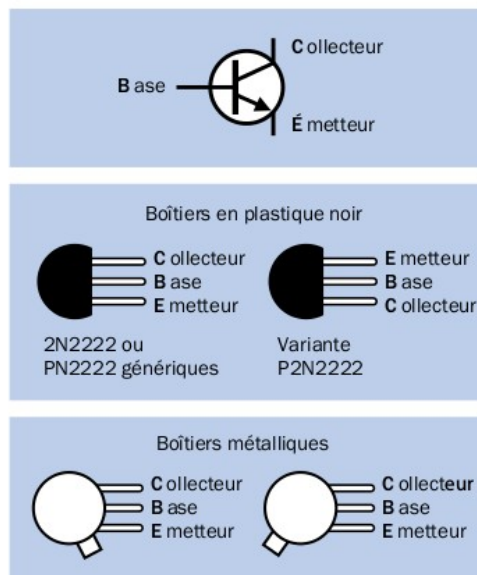


Figure 1-4. Schéma simplifié du transistor NPN, et représentation simplifiée des composants vus de dessus. Voir la remarque importante concernant l'inversion des fils sur le P2NP2222.

L'ergot du boîtier métallique pourra se trouver orienté différemment mais il sera toujours placé plus près du fil de connexion à l'émetteur du transistor que des autres fils. En ce qui concerne le symbole de schématique, vous savez que c'est un transistor NPN car la flèche pointe vers l'extérieur (mnémotechnique anglais : *Never Point iN*).

Attention : brochages non standards

Depuis longtemps, lorsque l'on observait un transistor à boîtier plastique par le dessus en plaçant le méplat à sa droite, les connexions étaient toujours identifiées Collecteur, Base et Émetteur du bas vers le haut. Certains fabricants ont appelé ces transistors PN2222 mais en conservant le brochage identique.

Pour des raisons qui demeurent obscures, aux environs de 2010, une variante portant la référence P2N2222 a été produite par On Semiconductor, Motorola et peut-être d'autres fabricants. Ses performances étaient identiques à celles du 2N2222 mais le brochage de ses fils était inversé.

Si vous cherchez sur Internet un fournisseur du 2N2222 ce qui serait normal, le 2N2222 étant la référence générique la plus répandue pour ce transistor, il se pourrait que le P2N2222 vous soit proposé car votre texte de recherche est inclus dans P2N2222. Si vous achetez ce composant, ses caractéristiques étant identiques, vous risquez de le relier de façon erronée dans votre circuit.

Phénomène aggravant, les transistors fonctionnent jusqu'à un certain point lorsque leurs connexions sont inversées mais de façon dégradée. Ainsi, vous pouvez utiliser le P2N2222 de façon erronée et obtenir un résultat, toutefois, ce ne sera pas tout à fait ce que vous attendiez. Si vous découvrez votre erreur et connectez correctement votre P2N2222, il y a de fortes chances que votre circuit ne fonctionne toujours pas tel que vous l'espériez, votre transistor pourrait en effet avoir été endommagé par cette inversion de polarité.

Quiconque achetant des composants doit être attentif à vérifier les références et bien tenir compte des configurations décrites à la fig. 1-4. Et, comme toujours, il est important de contrôler en détail les fiches techniques.

Fondamentaux : conducteurs et isolants

Apprenez davantage de cette expérience en attendant que la colle sèche. Plus la colle sera sèche, moins la LED réagira. Pour quelle raison ? Une partie de l'eau contenue dans la colle s'évapore avec le temps tandis que le reste est absorbé par le carton.

Pour mémoire, dans le livre *L'Électronique en pratique*, nous avons vu que le courant électrique est un flux d'électrons. Les atomes ou molécules qui présentent un surplus ou un déficit d'électrons sont appelés des ions. Je ne sais pas de quoi la colle blanche est constituée, mais apparemment elle comporte un composé chimique qui autorise le transfert d'ions. L'eau contenue dans la colle facilite ce transfert car les ions se déplacent dans l'eau.

L'eau en elle-même n'est pas un très bon conducteur. Pour le prouver, vous devez utiliser de l'eau purifiée – pas celle disponible à votre robinet, qui contient des impuretés minérales. De l'eau pure ou eau distillée, obtenue en la faisant bouillir afin de générer de la vapeur, (laissant les impuretés dans le récipient), ensuite condensée. On parle de moins en moins d'eau distillée car sa production est très consommatrice en énergie. On trouve le plus souvent de l'eau « désionisée » habituellement obtenue par un processus « d'osmose inversée ». Désionisée signifie qu'il n'y a pas d'ions dans cette eau n'est-ce pas ? Sans surprise, cette eau ne devrait donc pas très bien conduire l'électricité.

Insérez les pointes de touche de votre multimètre, espacées de quelques centimètres, dans un récipient d'eau distillée ou désionisée. Vous devriez mesurer une résistance de plus de 1 mégohm. Dissolvez du sel dans l'eau, la résistance mesurée devrait chuter radicalement, le sel étant une source d'ions.

Vous vous demandez peut-être où se situe la frontière entre conducteur et isolant. Pour répondre à cette question, vous devez savoir comment la résistivité est mesurée. C'est simple : si R est la résistance d'un objet exprimée en ohms, A étant sa surface en mètres carrés et L sa longueur en mètres :

$$\text{Résistivité} = (R \cdot A) / L$$

La résistivité est mesurée en ohm-mètre. Un très bon conducteur a une résistivité d'environ 0,00000003 ohm-mètre, soit 3 divisé par 100 millions. À l'opposé, un très bon isolant tel que le verre présente une résistivité d'environ 1 000 000 000 000 (un trillion) d'ohm-mètres.

À mi-chemin se situent les semi-conducteurs. Le silicium, par exemple, a une résistivité d'environ 640 ohm-mètres, mais cette valeur peut être réduite en « dopant » le silicium avec des impuretés et en le polarisant par un potentiel électrique afin d'encourager l'écoulement des électrons qui le traversent.

Quelle est la résistivité de la colle blanche ? Je vous laisse le soin de la déterminer à l'aide de votre multimètre. Et le carton ? Sa résistivité est si élevée, comment pourriez-vous la mesurer ? Voyez si vous pouvez imaginer une façon de le réaliser ?

Pour aller plus loin

En recommençant l'expérience 1, que se passe-t-il si vous utilisez une trace de colle trois ou quatre fois plus large ? Et si vous placez deux LED en parallèle ou en série ?

Peut-être pensez-vous connaître ce que sera le résultat. Il est toutefois toujours bon de vérifier ses prédictions en les mettant en œuvre.

J'ai mentionné précédemment que si vous connectiez le transistor de façon erronée, il pourrait malgré tout fonctionner. Il peut en effet supporter une faible tension inverse entre base et émetteur (moins de 6 V environ), mais l'utilisation d'une pile de 9 V pourrait provoquer une destruction du transistor. Est-ce que cela arrive si vous le tentez ? Et si oui, pourquoi ? Si vous cherchez plus d'information à ce sujet, vous serez amené à découvrir par vous-même comment sont structurées les différentes couches constitutives d'un transistor et comment les charges transigent d'une couche à une autre. Cela peut être utile à connaître.

Après avoir ainsi inversé un transistor dans un circuit, il pourrait avoir été détruit partiellement et ne devrait pas être utilisé dans d'autres circuits. Vous pouvez toutefois vous en servir à des fins de test dans l'expérience suivante et comparer ses performances avec celles d'un autre transistor n'ayant pas subi ces dommages.

Relevé de valeurs

Voici mon plan. Dans les prochaines expériences, je vais vous montrer quelques composants non étudiés dans *L'Électronique en pratique*. Les trois premiers seront les suivants :

- le phototransistor ;
- le comparateur ;
- l'amplificateur opérationnel.

Ces composants auront un rôle qui vous distraira et vous intéressera dans les expériences 3 à 14.

Vous devrez également vous familiariser avec les sujets tels que le design de circuit, particulièrement avec des composants analogiques. Nous utiliserons ensuite des circuits digitaux tels que :

- les portes logiques ;
- les décodeurs, encodeurs et multiplexeurs ;
- les compteurs et registres à décalage.

Enfin, je vous parlerai du hasard et des capteurs.

Mais tout d'abord, je veux être sûr que nous sommes au même niveau en ce qui concerne quelques concepts de base. Quand bien même vous pensez être familier avec ces concepts, les personnes les mieux informées peuvent toujours avoir quelques lacunes. Vous aurez besoin de ces informations pour comprendre les sections à venir.

Prérequis

Vous trouverez la liste des composants nécessaires pour chaque expérience dans l'annexe située à la fin de ce livre.

Je suppose que vous disposez déjà de l'alimentation stabilisée 5 V DC (courant continu) telle que celle de la fig. I-2. Chaque fois que vous voyez le mot « régulé » dans un schéma, une alimentation utilisant un LM7805 et les deux condensateurs seront nécessaires. Dans cette expérience, vous avez besoin d'une tension régulée pour réaliser des mesures précises.

Comportement des transistors

En électronique, les nombres sont inévitables. En fait, vous pouvez les considérer comme des amis, puisqu'ils vont vous dire ce qui se passe. Il est également indispensable de réaliser des mesures précises car, si vos mesures sont approximatives, les nombres ne vous guideront pas correctement et deviendront alors inutiles.

Ainsi, je veux réitérer la première expérience en utilisant un potentiomètre ajustable au lieu d'un trait de colle blanche et un multimètre au lieu d'une banale diode LED afin que vous puissiez évaluer les performances du circuit. (Cela sera similaire à l'expérience 10 du livre *L'Électronique en pratique* en approfondissant le sujet de l'amplification.)

Êtes-vous capable de réaliser des mesures précises ? Nous allons le savoir maintenant.

Étape 1

Réglez votre multimètre afin de mesurer des microampères en courant continu. Selon le multimètre que vous utilisez, vous devez simplement insérer le fil rouge dans la borne prévue pour la mesure du courant et positionner le sélecteur sur ampères. Si votre multimètre ne permet pas la sélection automatique de la gamme, choisissez la gamme microampères manuellement.

Quoi qu'il en soit, assurez-vous de bien mesurer du courant continu et que le fil rouge est correctement inséré dans la borne « ampères ».

Utilisez votre appareil de mesure comme sur la fig. 2-1.

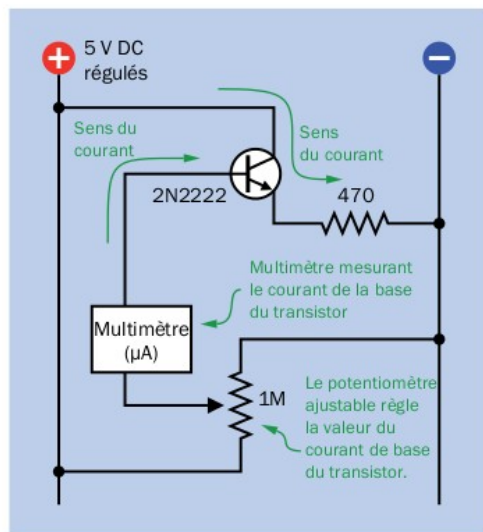


Figure 2-1 Le multimètre mesure le courant circulant dans la base du transistor.

Si vous avez une quelconque difficulté pour interpréter ce schéma, reportez-vous à la fig. 2-2. Celle-ci montre un multimètre à réglage de gamme manuel, mesurant le courant entre le curseur du potentiomètre et la base du transistor 2N2222 en utilisant des fils de liaison flexibles, munis de griffe-fils. Les fils rouge et noir torsadés situés à droite sur la figure amènent l'alimentation régulée 5 V DC à la plaque de montage. L'affichage du multimètre est une valeur arbitraire.

Une vue rapprochée de cette platine d'essai est exposée sur la fig. 2-3. Les fils rouge et noir terminés par des embouts et insérés dans la platine proviennent du multimètre. Le potentiomètre ajustable est orienté de la même manière que dans le schéma et chacun de ses fils est inséré dans une rangée séparée de la plaque. Si vous tourniez le potentiomètre de 90 degrés, deux de ses fils seraient insérés dans la même rangée de trous et cela ne fonctionnerait pas.

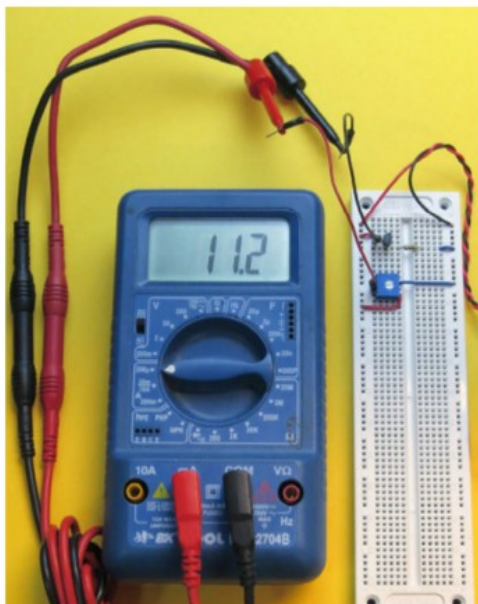


Figure 2-2 Branchement d'un multimètre mesurant en microampères le courant circulant entre le curseur du potentiomètre ajustable et la base du transistor 2N2222.

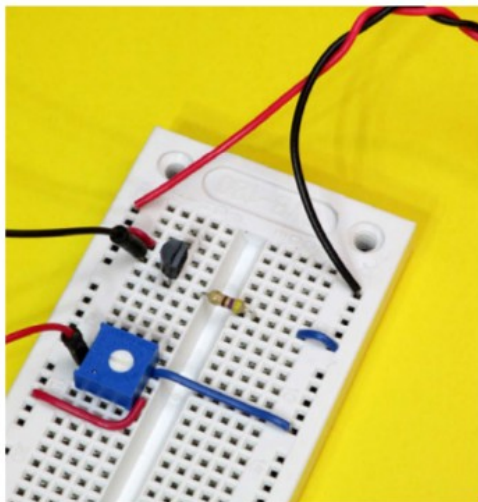


Figure 2-3 Vue rapprochée de la platine de la photo ci-dessus.

Ajustez le potentiomètre jusqu'à ce que le multimètre indique $5\text{ }\mu\text{A}$. Il s'agit du courant de base – le courant circulant depuis la gauche du potentiomètre vers la base du transistor.

Étape 2

Relevez et notez le courant de base. Disposer d'un cahier de notes dans votre laboratoire serait une bonne idée et vous pourriez vous en servir dès maintenant. Si vous enregistrez ainsi chaque expérience pas à pas, cela pourrait vous être utile pour vous en rappeler par la suite.

Étape 3

Déconnectez les fils du multimètre de la plaque de montage et remplacez-les par un fil de liaison. Modifiez le réglage du multimètre afin de mesurer des milliampères, s'il n'est pas à sélection de gamme automatique et placez le dans la position indiquée sur la fig. 2-4.

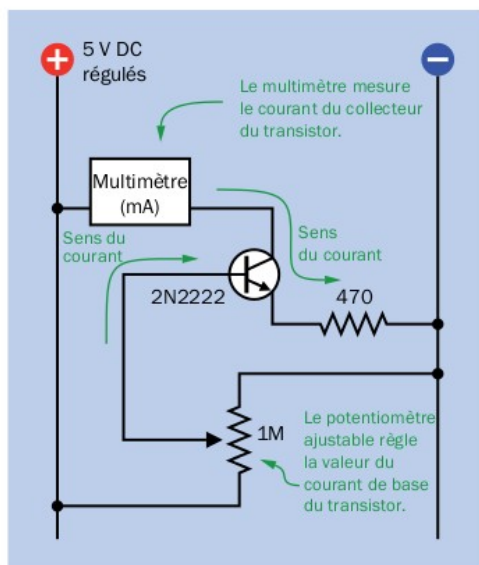


Figure 2-4. Le multimètre mesure maintenant le courant circulant dans le collecteur du transistor.

La fig. 2-5 montre une photo de cette configuration. Les deux extrémités d'un fil de liaison jaune ont été insérées à l'endroit où les fils du multimètre étaient précédemment positionnés (c'est-à-dire entre la base

du transistor et le point milieu du potentiomètre ajustable), et le multimètre est maintenant connecté entre la ligne d'alimentation positive et le collecteur du transistor.

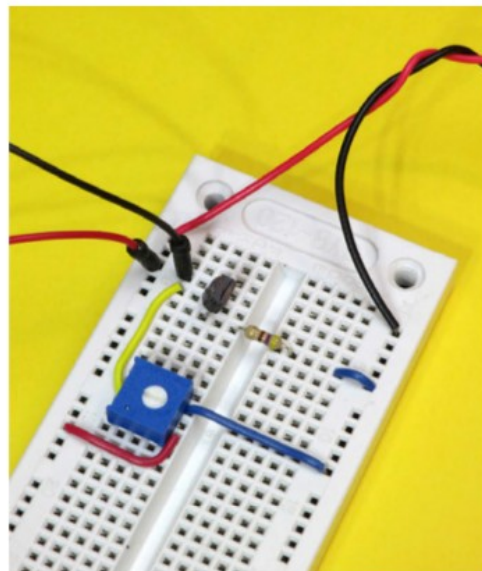


Figure 2-5. Les fils rouge et noir à gauche sont reliés au multimètre qui mesure maintenant le courant circulant dans le collecteur du transistor.

Étape 4

En plus du courant de base que vous avez noté précédemment, inscrivez maintenant la valeur lue sur le multimètre. Il s'agit du courant collecteur.

Étape 5

Revenez à l'étape 1, en réglant cette fois le potentiomètre afin d'ajouter $5\text{ }\mu\text{A}$ au courant de base. (N'oubliez pas de remettre votre multimètre en position microampères si nécessaire.)

Répétez ensuite les étapes 1 à 5 pour remplir un tableau de valeurs dans lequel le courant de base, noté dans la colonne de gauche, varie de $5\text{ }\mu\text{A}$ à $40\text{ }\mu\text{A}$ par successifs de $5\text{ }\mu\text{A}$ et notez dans la colonne de droite le courant collecteur mesuré à chaque étape. Il en résultera huit valeurs, ce qui n'est pas trop fastidieux à

relever, même si les modifications successives du branchement du multimètre sont répétitives. Le résultat devrait ressembler à celui des deux premières colonnes de la fig. 2-6. J'ai mesuré ces valeurs moi-même. Sont-elles similaires aux vôtres ?

Courant de base (I_B en μA)	Courant collecteur (I_C en mA)	Courant collecteur (I_C en μA)	I_C/I_B Valeur du gain béta	Tension entre émetteur et masse
5	1,0	1 000	200	0,45
10	2,1	2 100	210	0,98
15	3,2	3 200	213	1,52
20	4,3	4 300	215	2,02
25	5,3	5 300	212	2,52
30	6,4	6 400	213	3,03
35	7,5	7 500	214	3,51
40	8,6	8 600	215	3,96

Figure 2-6. Comparaison entre le courant de base et le courant collecteur d'un transistor NPN.

Vous devez maintenant convertir chaque valeur du courant collecteur de milliampères à microampères pour pouvoir effectuer une division qui n'aura de sens que si les unités utilisées sont identiques. On compte 1 000 microampères dans un milliampère, il suffit donc de multiplier la valeur du courant collecteur que vous avez mesuré par 1 000 pour obtenir sa valeur en microampères. Vous pouvez constater le résultat dans la troisième colonne de la table de valeurs de la fig. 2-6.

Prenez maintenant votre calculatrice et divisez le courant collecteur par le courant de base pour chacune des huit paires de valeurs. Après avoir calculé une ou deux valeurs, vous devriez vous apercevoir que le rapport est pratiquement identique. Cela est inscrit dans la quatrième colonne de mon tableau.

Le courant collecteur divisé par le courant de la base représente le gain d'amplification en courant du transistor.

Attention: multimètre en danger !

Soyez prudent en effectuant les mesures d'intensité. Un courant excessif pourrait griller le fusible de votre multimètre. Il est recommandé de garder des fusibles

de rechange. De même, lorsque vous aurez terminé vos mesures d'intensité et mis votre multimètre à l'écart de votre circuit, vous pourriez oublier de remettre le fil rouge dans la bome permettant la mesure des tensions. Une bonne habitude consiste à remettre systématiquement le fil rouge dans la bome de mesure des tensions, car le multimètre est bien moins vulnérable dans cette configuration.

Abréviations et fiches techniques

Remarquez I_B et I_C sur la fig. 2-6. Rappelez-vous que cette lettre I est généralement utilisée pour indiquer une intensité. Ainsi, si vous pensez qu' I_B est le courant de base et I_C le courant collecteur, vous avez raison.

Vous retrouverez ces abréviations dans pratiquement toutes les feuilles de caractéristiques des transistors, elles indiquent en général la valeur maximale admissible. C'est une information primordiale. Lorsque vous commencerez à élaborer un projet vous-même, les valeurs maximales des courants de base et collecteur vous permettront de choisir un transistor qui ne risquera pas d'être surchargé.

Maintenant, selon vous, que signifie I_E ? Si vous pariez que cela représente le courant de l'émetteur, vous avez encore raison bien que cette abréviation soit moins utilisée. En effet, il s'agit de la combinaison d' I_B et I_C . L'intensité qui entre par le collecteur et la base ne peut en effet ressortir du transistor que par son émetteur, ainsi :

$$I_E = I_B + I_C$$

Voici quelques autres abréviations usuelles pour les transistors NPN.

- V_{CC} est la tension d'alimentation, cela signifie Tension à collecteur commun (*Voltage at Common Collector*) mais indique également la tension d'alimentation de tout circuit, même en l'absence de transistor.
- V_{CE} représente la différence de potentiel entre le collecteur et l'émetteur.
- V_{CB} représente la différence de potentiel entre le collecteur et la base.
- V_{BE} représente la différence de potentiel entre la base et l'émetteur.

Une fiche technique précisera également de façon habituelle la valeur bêta d'un transistor, en utilisant souvent la lettre grecque β . Cette valeur indique de combien le transistor amplifie son courant de base. Elle est simplement calculée en divisant I_c par I_b ce que vous avez effectué après l'étape 5. Remarquez que la quatrième colonne de la table de la fig. 2-6 est intitulée « Valeur du gain bêta ».

La régularité de la valeur bêta dans la quatrième colonne révèle que le transistor utilisé est un composant linéaire. En d'autres termes, si vous tracez le graphique de cette valeur, vous obtiendrez une ligne droite comme le montre la fig. 2-7.

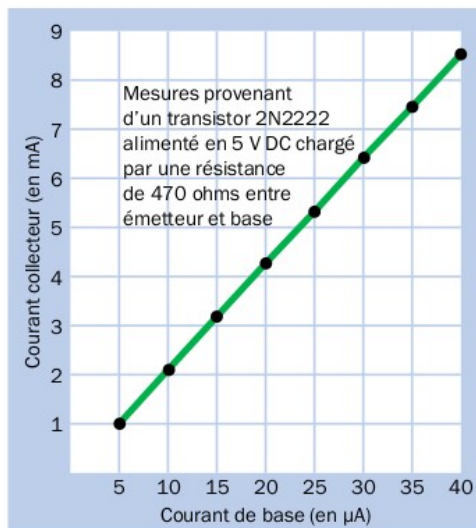


Figure 2-7. Graphique obtenu à partir des données de deux premières colonnes de la table précédente.

Vous pouvez créer un graphique à partir des valeurs obtenues en utilisant un logiciel de tracé de courbes (Microsoft Excel fera l'affaire) ou à l'ancienne sur papier. Votre cahier de notes devrait comporter quelques feuilles quadrillées ou millimétrées. Vous pourrez également télécharger et imprimer des fichiers PDF de différents papiers pour graphiques pour vos tracés sur Internet via la recherche « imprimer papier millimétré ».

À votre avis, pourquoi la valeur bêta n'est pas absolument identique pour chaque paire de valeurs mesurées ? Parce que votre multimètre n'est pas totalement

précis (particulièrement pour la mesure des faibles intensités en microampères), et votre transistor peut présenter de petites imperfections. Néanmoins, le coefficient d'amplification est suffisamment constant pour que ce transistor puisse être utilisé comme amplificateur de précision pour des signaux fluctuants comme les signaux audiophoniques. Lorsque l'on recourt un transistor comme un interrupteur, on ne se préoccupe pas vraiment de cela.

Comment se fait-il que les valeurs que vous avez mesurées ne soient pas identiques à celles que j'ai mesurées ? Il existe beaucoup de *variables hors contrôle*. En effet, votre multimètre et le mien proviennent de fabricants différents. Votre régulateur de tension peut également différer légèrement du mien. Les cordons de mesure peuvent ne pas entrer correctement en contact. La température de fonctionnement du transistor peut induire de faibles différences. Le monde est plein de variables hors contrôle. On ne peut jamais s'en défaire.

De plus, les transistors présentent des différences de fabrication. Une fiche technique indique parfois une plage de valeurs bêta que l'on peut trouver dans des composants du même type, même si votre équipement de mesure est très précis.

Les personnes qui créent des logiciels sont habituées à utiliser des valeurs absolument précises, mais, dans le monde du matériel, le mieux que l'on puisse faire est de réaliser des circuits qui produisent un résultat assez identique dans des situations variées. C'est ainsi !

Tension et amplification en courant

Peut-être vous rappelez-vous que, dans *L'Électronique en pratique*, le transistor était un amplificateur de courant. Les ouvrages d'introduction font toujours cette affirmation, et la valeur bêta est la mesure du gain en courant. Cependant, on oublie fréquemment de mentionner que la tension d'émetteur d'un transistor NPN a aussi tendance à varier selon les variations du courant de base pour autant que les autres paramètres (telle que la charge du transistor), demeurent identiques.

La fig. 2-8 montre le schéma qui va vous le prouver. La plupart des mesures de tensions sont réalisées entre le point du circuit que l'on étudie et le pôle négatif de l'alimentation (la masse). Vous ne devez pas mettre le multimètre en série avec la résistance de 470 Ω dans ce circuit ! Et n'oubliez pas de régler votre multimètre

pour la mesure de tensions et non d'intensités, en déplaçant le fil rouge sur la borne appropriée si cela est nécessaire (et c'est souvent le cas).

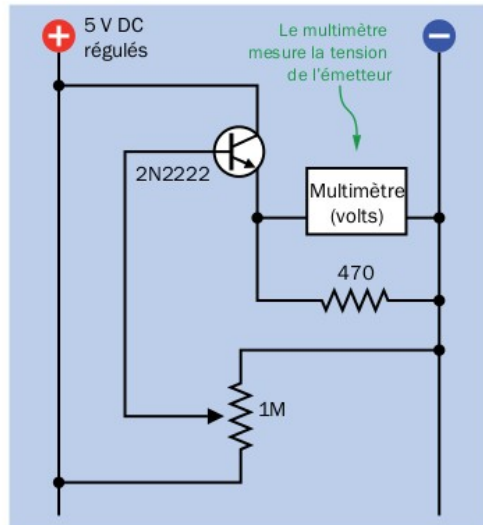


Figure 2-8. Dans cette configuration, le multimètre mesure la tension entre l'émetteur du transistor et le pôle négatif de l'alimentation (sans oublier de configurer le multimètre pour la mesure de tension et non d'intensité).

La cinquième colonne du tableau de la fig. 2-6 montre les mesures des tensions que j'ai relevées. J'ai utilisé ces valeurs pour tracer une autre courbe illustrée sur la fig. 2-9, comparant le courant de base avec la tension de l'émetteur. À nouveau, il s'agit d'une ligne quasiment droite.

Si un transistor est un amplificateur de courant, comment la tension d'émetteur peut-elle varier comme le courant ? Pour cela, réfléchissons à ce qui se passe à l'intérieur d'un transistor.

- L'augmentation du courant de base provoque une réduction effective de la résistance interne du transistor. C'est pourquoi le courant qui traverse le transistor augmente.
- De plus, le transistor est en série avec la résistance de $470\ \Omega$, les deux composants réalisant ainsi une sorte de diviseur de tension.

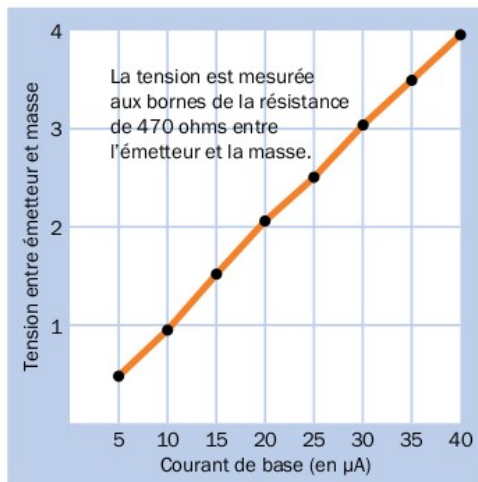


Figure 2-9. La tension d'émetteur varie pratiquement linéairement avec le courant de base dans un transistor 2N2222. Cette courbe a été tracée à partir des valeurs de la table précédente.

Dans *L'Électronique en pratique*, nous avons vu que lorsque deux résistances sont placées en série, elles divisent la tension à leurs bornes, en fonction de leurs résistances respectives. Si la première résistance a une valeur faible, elle ne bloque pas beaucoup la tension, la seconde résistance provoque alors une chute de tension plus importante et vice versa.

Examinez la fig. 2-10 ci-contre. Dans ce schéma, au lieu de mettre un transistor en série avec la résistance de $470\ \Omega$, j'ai utilisé plusieurs autres résistances de valeurs variées. Pouvez-vous prévoir la tension qui sera mesurée aux points A, B, C et D ? C'est une expérience que vous pouvez réaliser rapidement vous-même. J'apporterai la réponse à cette question théorique à la fin de cette expérience.

Rappelons la formule de calcul de la tension au point milieu de deux résistances.

Dans la formule :

- V_m est la tension au point milieu ;
- V_{cc} est la tension d'alimentation ;
- $R1$ est la valeur de la résistance (en ohms) reliée au pôle positif ;
- $R2$ est la valeur de la résistance (en ohms) reliée au pôle négatif.

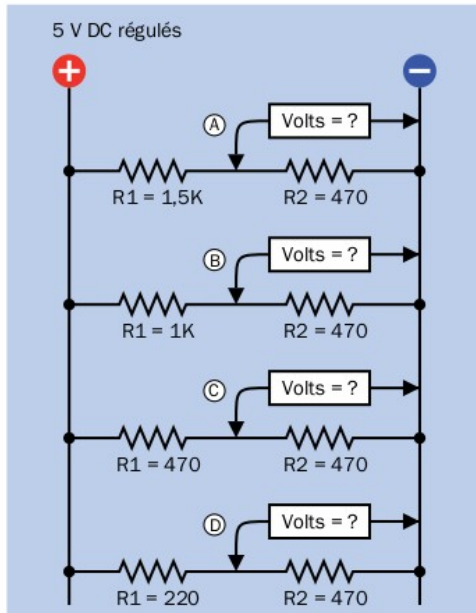


Figure 2-10. Le concept du diviseur de tension est fondamental en électronique. Assurez-vous que vous le comprenez clairement.

La formule est :

$$V_M = V_{CC} * (R2 / (R1 + R2))$$

Peut-être comprenez-vous maintenant pourquoi la tension de l'émetteur augmente quand le courant de la base s'accroît dans le circuit de la fig. 2-8. Le courant de base réduit la résistance interne du transistor. De ce fait, le transistor impose une résistance moins importante entre l'émetteur (où vous effectuez la mesure de tension) et le pôle positif de l'alimentation. En conséquence, la tension que vous mesurez augmente. Cela est illustré sur la fig. 2-11.

La tension d'émetteur ne peut jamais être supérieure à la tension d'alimentation. De même, la tension appliquée à la base du transistor sera comprise entre 0 volt et la tension d'alimentation.

Pourquoi ? La tension de base est issue du potentiomètre de 1M, qui agit comme un autre pont diviseur entre les deux pôles de l'alimentation.

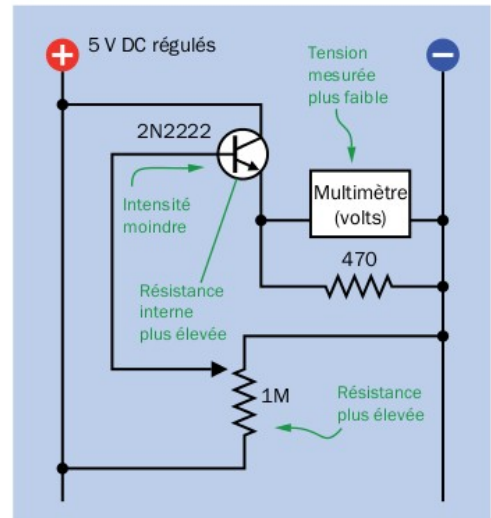
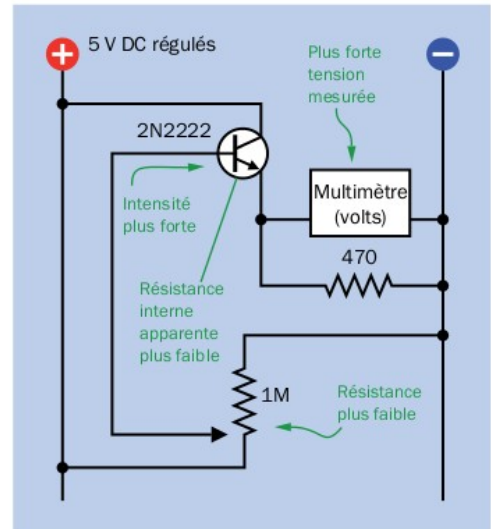


Figure 2-11. Conséquences d'un courant de base plus élevé (schéma du haut) et moins élevé (schéma du bas) dans un transistor NPN.

Puisque la tension d'émetteur ne peut pas dépasser celle de la base, nous pouvons conclure qu'un transistor bipolaire n'amplifie pas les tensions. Les variations de

la tension d'émetteur peuvent néanmoins être utiles comme vous le verrez quand vous commencerez à utiliser un phototransistor dans l'expérience 3.

En bref : les tensions

Jusqu'à présent, j'ai émis quelques hypothèses sans les justifier. J'ai considéré les points suivants.

- La tension positive dans un circuit est constante.
- Tous les points d'un circuit reliés au pôle négatif de l'alimentation ont un potentiel de 0 volt.
- Un calcul simple définit le comportement d'un pont diviseur.
- La mesure des tensions ou intensités peut être effectuée en n'importe quel point d'un circuit sans le perturber.

En pratique, ces affirmations ne sont pas tout à fait exactes !

V_{cc} peut être inférieure à V_{cc}

Toute source d'alimentation a ses limites. Si vous la chargez fortement avec un composant ou une faible résistance, cela peut diminuer sa tension. Le régulateur LM7805 s'oppose parfaitement à cette tendance mais il n'est pas parfait non plus.

Le niveau zéro peut être plus grand que zéro

Nous considérons que la masse est à 0 volt. En réalité, plusieurs composants évacuent du courant dans la liaison de masse, et le fil qui conduit ce courant vers la masse présente une faible résistance. Selon l'endroit où vous créez une liaison avec la masse, le potentiel de masse peut ne pas être précisément zéro relativement au pôle négatif de l'alimentation.

Les diviseurs de tension sont approximatifs

La tension au point milieu sera diminuée si vous y reliez un composant ayant une faible résistance qui, ainsi, y prélève du courant.

Les mesures perturbent les mesures

La mesure de tension (ou de courant) peut elle-même affecter les mesures effectuées, votre multimètre ayant sa propre résistance interne. Elle est certes très élevée mais pas infinie en position de mesure de tensions. Elle

est très faible mais pas nulle lorsque l'on mesure une intensité. Si la résistance interne de votre multimètre est différente de celle du mien, les valeurs que nous mesurerons seront différentes.

Pour aller plus loin : mesures à l'ancienne

Pour ceux qui, comme moi, aiment les gadgets, voici le meilleur moyen de répéter l'expérience 2.

Bien avant l'invention du multimètre multifonction et multigamme, il était possible d'acheter des appareils de mesure analogiques réservés à un seul usage (galvanomètres). Ils mesuraient des tensions en volts ou millivolts ou des intensités en ampères ou milliampères avec des gammes fixes. En fait, vous pouvez toujours vous procurer ces appareils et en installer une paire dans votre circuit de test de transistor, évitant ainsi de devoir déplacer alternativement votre multimètre.

Sur eBay, j'ai trouvé des petits appareils en provenance de Hong Kong pour à peine 5 € chacun. Vous pouvez également vous en procurer en magasin ou sur les sites de vente en ligne : ils sont légèrement plus chers mais vous les avez plus rapidement.

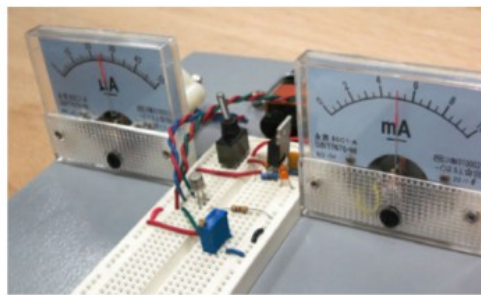


Figure 2-12. Deux galvanomètres indiquant immédiatement l'amplification en courant d'un transistor 2N2222. Le composant rectangulaire bleu au premier plan est un potentiomètre ajustable à vis.

Pour ma part, j'en ai choisi un ayant une échelle de mesure de 0 μ A à 50 μ A, l'autre de 0 mA à 10 mA. Ces gammes de mesures correspondaient exactement à ce dont j'avais besoin. Je les ai reliés comme indiqué sur la fig. 2-12. J'ai eu plaisir à observer les aiguilles et leur mouvement parfaitement synchrone alors que je réglais le potentiomètre ajustable. Ce n'est peut-

être pas la façon habituelle de se divertir un samedi soir (ou même un lundi soir) mais cela constituait une démonstration vivante.

En bref : les transistors

Certaines personnes prennent plaisir à travailler avec des nombres. D'autres pas. J'ai pensé qu'il pourrait être plus agréable d'assembler quelques composants entre eux et d'observer ce qui se passe (avec ou sans colle blanche). Plus vous avancez en électronique, plus il est important de comprendre réellement comment cela fonctionne, et pour cela, vous avez besoin d'un peu d'arithmétique. Il ne vous en coûtera pas trop car dans un circuit fonctionnant en courant continu, vous aurez rarement à dépasser la complexité des multiplications et des divisions. Dans les circuits analogiques, des calculs mathématiques sont nécessaires mais cela se situe au-delà de l'objectif de ce livre.

Voici ce que vous devez retenir de cette simple démonstration.

- Un transistor bipolaire est un composant linéaire, ce qui signifie que le rapport entre l'intensité entrant dans son collecteur et l'intensité entrant dans sa base est pratiquement constant et le graphique de ces deux variables est proche d'une droite.
- La valeur β d'un transistor est son gain en courant – le rapport entre l'intensité entrant dans son collecteur et l'intensité entrant dans sa base.
- La tension d'émetteur d'un transistor bipolaire NPN varie avec le courant, à condition que l'émetteur ait une charge constante.
- Un transistor bipolaire n'est pas un amplificateur de tension puisque la tension de son émetteur ne peut pas dépasser celle de sa base.

Quelques données supplémentaires :

- La *polarisation directe* (*forward bias*) appliquée à un transistor NPN est une tension positive de sa base par rapport à son émetteur. Une *polarisation inverse* (*negative bias*) signifie que la base a une tension inférieure à celle de l'émetteur. Évitez cela car c'est dangereux pour le transistor.
- La *région de coupure* (*cutoff region*) se situe où VBE (la polarisation directe) est inférieure à environ

0,6 V. Dans cette zone, les porteurs de charges à l'intérieur du transistor ne sont pas suffisamment excités et rien ne se passe. Un très faible courant appelé *courant de fuite* (*leakage*), traverse le composant lorsqu'il est insuffisamment polarisé directement. Ceci permet à un transistor d'être utilisé en interrupteur.

- La *zone active* d'un transistor est la zone où il fonctionne en amplificateur de courant. La limite haute de cette région se situe quand la résistance interne entre le collecteur et l'émetteur diminue tellement qu'elle ne présente quasiment aucune limite au courant y circulant. C'est la *zone de saturation* dans laquelle une surchauffe interviendra.

Un transistor peut bien entendu également surchauffer dans la zone active si on ne limite pas le courant qui y circule. Il faut toujours placer une charge résistive (résistance ou tout autre composant résistif) en série avec un transistor. N'appliquez jamais les deux pôles d'une alimentation directement entre le collecteur et l'émetteur d'un transistor.

Les fiches techniques précisent des valeurs telles que $V_{CE(SAT)}$ qui indiquent les limites de saturation. Ces fiches peuvent paraître rébarbatives, lorsque par exemple elles ne mentionnent pas la définition de certains termes ou lorsqu'aucun schéma d'application typique du composant n'y figure. Elles sont néanmoins essentielles si vous décidez d'être créatif et souhaitez modifier des circuits ou en créer d'autres. Lorsque vous utilisez un composant nouveau, il est sage de rechercher sa fiche technique et d'en imprimer le contenu pour pouvoir s'y référer ultérieurement.

Réponses concernant l'exemple du diviseur de tension

A. $5 * (470 / 1\ 970) =$ environ 1,2 V

B. $5 * (470 / 1\ 470) =$ environ 1,6 V

C. $5 * (470 / 940) =$ 2,5 V

D. $5 * (470 / 690) =$ environ 3,4 V

Assez de nombres, maintenant ! Il est temps de jouer avec la lumière.

De la lumière au son

Dans ce projet, vous allez vous familiariser avec le phototransistor. La fig. 3-1 en montre le symbole, qui ressemble beaucoup à un transistor bipolaire NPN. En fait, son collecteur et son émetteur ont le même rôle. La grande différence se situe au niveau de la base qui est activée par la lumière, indiquée par une ou deux flèches pointant vers elle.

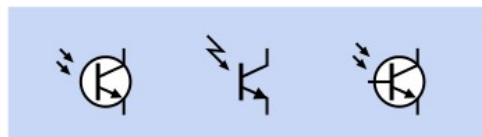


Figure 3-1. Symboles d'un phototransistor. Ceux à gauche et au centre sont fonctionnellement identiques. Le symbole de droite indique un type avec connexion de base permettant de renforcer la tension induite par la présence de la lumière.

Parfois, le cercle autour du symbole est omis, ou encore une flèche en zigzag au lieu de deux flèches droites. Ces variantes n'indiquent aucune différence fonctionnelle. Cependant, si une connexion issue de la base est disponible, cette liaison permet de renforcer l'effet résultant de la lumière reçue. Je précise ce point afin que vous le reconnaissiez si vous le rencontrez. Ce n'est pas ce type de phototransistor que j'utilise dans cet ouvrage.

Ne confondez pas les phototransistors avec les photorésistances ! Les photorésistances sont communément appelées cellules photoélectriques, je les ai décrites dans *L'Électronique en pratique*. Elles sont très simples à utiliser car elles ne nécessitent pas d'alimentation. Leur résistance varie simplement en fonction de la lumière. Toutefois, contenant du sulfure de cadmium nocif pour l'environnement, elles sont rarement stockées par les

revendeurs. Vous pourrez en trouver sur eBay, mais j'évite d'en employer dans un circuit car elles pourraient devenir difficiles à approvisionner dans le futur.

En remplacement, les phototransistors sont maintenant très largement utilisés dans les diverses applications allant de l'allumage automatique de l'éclairage public à la réception des signaux infrarouges de la télécommande de votre téléviseur.

Tonalité audio photosensitive

Rappelez-vous que l'annexe du livre dresse la liste des composants nécessaires à chaque expérience.

Commencez par assembler le circuit représenté sur la fig. 3-2 page suivante. J'utilise un circuit temporisateur 555 qui est très utile pour réaliser un démonstrateur. La sortie de la version bipolaire du 555 peut commander une diode LED, voire un petit haut-parleur, comme dans cet exemple. La version CMOS, dont la référence comporte souvent les chiffres 7555, ne pourrait pas délivrer une puissance aussi importante.

Vous devez faire attention à placer le phototransistor de façon correcte, selon la règle suivante : une intensité positive entre par le fil le plus court du phototransistor et en sort par le fil le plus long.

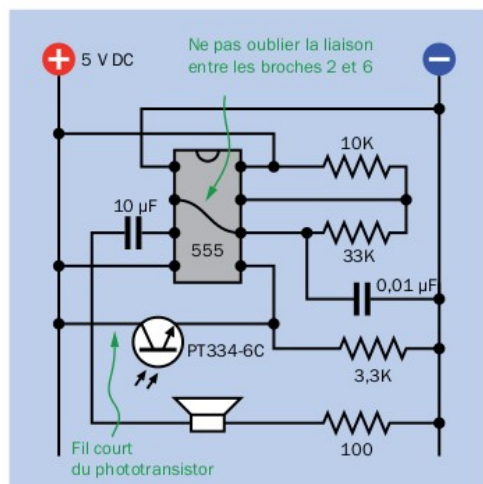


Figure 3-2 Cette démonstration met en évidence le fonctionnement d'un phototransistor par une indication sonore.

Le fil court doit donc se trouver à gauche dans ce schéma.

C'est trompeur car les diodes LED ressemblent aux phototransistors mais vous savez que le fil long d'une LED doit être plus positif que le fil court. Les phototransistors sont donc à l'opposé. Vous pouvez mémoriser cette opposition en vous souvenant qu'un phototransistor absorbe la lumière tandis qu'une diode LED en produit. En conséquence, leurs connexions sont inversées.

Voici une autre règle. Puisque diode LED et phototransistors se ressemblent, prenez soin de ranger les phototransistors dans une boîte clairement étiquetée afin de ne pas les confondre avec vos diodes LED !

La fig. 3-3 montre une photo du circuit réalisé. Dans cette vue, la résistance de 100 Ω en série avec le haut-parleur n'est pas utilisée, car le haut-parleur présente une impédance de 63 Ω. Toutes les autres connexions sont identiques.

N'oubliez pas de relier les broches 2 et 6 du circuit 555 avec un fil prédécoupé. Sur la photo, il s'agit ici du fil vert qui passe au-dessus du circuit intégré dans le schéma. Lorsque vous êtes sûr de vos connexions, alimentez le

circuit pour découvrir comment le son délivré par le haut-parleur varie en fonction de la lumière appliquée au phototransistor.

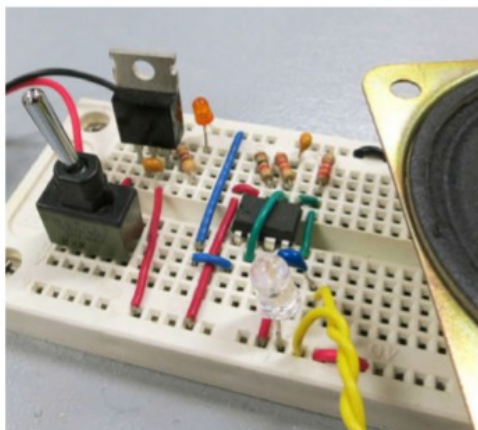


Figure 3-3. Version sur plaque de montage du circuit de test d'un phototransistor utilisant un temporisateur 555. Le phototransistor est le composant transparent près des fils jaunes. Le haut-parleur est partiellement visible à droite.

Le brochage du 555 est indiqué sur la fig. 3-4. Je rappellerai la fonction de chaque broche plus en détail dans l'expérience suivante.

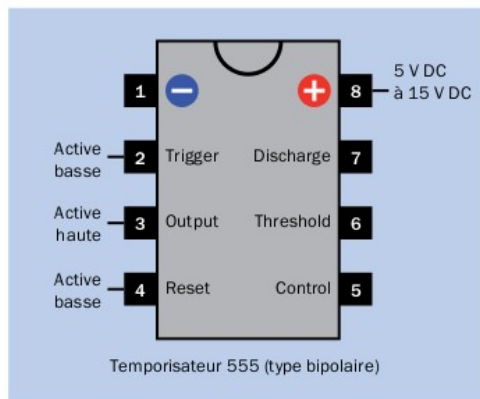


Figure 3-4. Brochage du temporisateur 555. Les valeurs d'alimentation indiquées ne sont valables que pour le type bipolaire TTL original.

Faites l'expérience en modifiant la valeur des résistances de 10K et 33K ou utilisez une valeur assez inférieure ou supérieure pour le condensateur de 0,01 μ F. Vous souvenez-vous de la formule qui permet de déterminer la fréquence de fonctionnement d'un temporisateur en mode astable ? Je vous rappellerai les informations essentielles dans la prochaine expérience. Le point important est que la broche 5 (en bas à droite du circuit intégré), contrôle le fonctionnement du circuit. La tension appliquée à cette broche ajuste la référence que le temporisateur utilise pour déterminer la fin du cycle « passant » et bascule en mode « bloqué ». De

ce fait, la broche de contrôle ajuste la tonalité du son que le temporisateur crée lorsqu'il fonctionne à une fréquence audible.

La combinaison du transistor et de la résistance de 33K se comporte comme un diviseur de tension fonctionnant comme je l'ai écrit dans la section « En bref : les tensions » page 20. Quand la lumière illumine le phototransistor, sa résistance interne diminue, modifiant ainsi la tension de la broche 5 du temporisateur. Mais savons-nous de combien la tension va chuter ? Nous allons le déterminer maintenant.

Mesure de la lumière

Observez le schéma très simple de la fig. 4-1, il paraît similaire au circuit de la fig. 2-8. Vous pouvez l'ajouter séparément à votre platine de montage sans détruire le circuit précédemment créé lors de l'expérience 3. Déplacez simplement le phototransistor et la résistance un peu plus bas sur votre plaque.

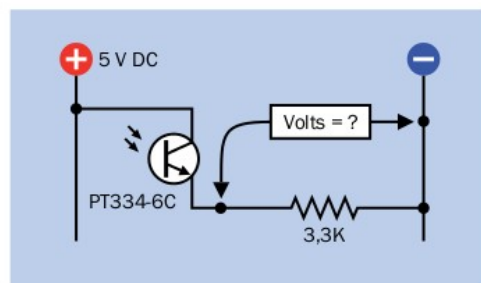


Figure 4-1. Circuit de test d'un phototransistor.

J'ai choisi une résistance de 3K3, car je veux obtenir la gamme de tensions la plus large possible pour l'émetteur du phototransistor.

Illuminez maintenant le phototransistor et mesurez la tension de son émetteur. Essayez avec une lampe de bureau, une diode LED blanche, une lampe de poche ou une LED de couleur. La lumière appliquée crée un très faible courant à la base du transistor qui, amplifié, s'écoule du collecteur vers l'émetteur.

Une lumière brillante réduit la résistance interne apparente. Pour vous en rappeler, imaginez que la lumière chasse la résistance.

Si vous vous rappelez ce que j'ai écrit au sujet du diviseur de tension à la fin de l'expérience 2, vous remarquerez que quand le phototransistor a une résistance interne apparente faible, la tension que vous mesurez dans le circuit de la fig. 4-1 augmente. Le phototransistor s'oppose moins au passage du courant depuis le pôle positif de l'alimentation.

En particulier, dans ce circuit, une lumière brillante accroît la tension de l'émetteur.

Ceci est vrai uniquement si vous réalisez le circuit tel que sur la fig. 4-1.

Maintenant inversez les composants comme sur la fig. 4-2. La tension diminuera avec une forte lumière, simplement parce que le phototransistor présente une résistance plus faible entre le point de mesure et le pôle négatif de la masse.

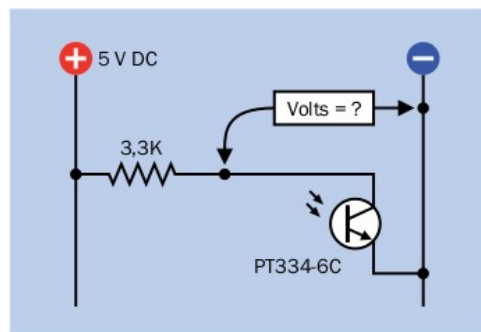


Figure 4-2. Si le phototransistor et la résistance sont inversés, la tension au point de mesure sera réduite pour une lumière plus intense.

Utilisation des phototransistors

Les phototransistors sont disponibles en de nombreuses variantes. J'en ai choisi un sensible à une large plage du spectre lumineux, de sorte que vous pouvez l'éclairer avec n'importe quelle lumière colorée pour qu'il réagisse. De nombreux phototransistors sont uniquement sensibles dans le spectre des infrarouges car ils sont prévus pour réagir à la lumière émise par une diode LED émettant des rayons infrarouges. Quand le phototransistor et la diode LED possèdent un même spectre de fonctionnement étroit, il y a moins de chance de réaction au bruit ou aux signaux erronés.

Rappelez-vous que votre multimètre présente une forte résistance. Si vous le remplacez par un composant de résistance relativement faible, il se combinera avec la résistance de 3K3 pour absorber davantage de courant du phototransistor, au risque de provoquer sa surcharge. Par chance en ce qui nous concerne, les circuits logiques, les microcontrôleurs et autres composants digitaux disposent d'une forte impédance d'entrée qui permet de les relier directement à l'émetteur d'un phototransistor tant que l'on utilise une alimentation électrique adéquate, en général 5V DC.

Si vous pilotez l'entrée d'un circuit logique avec la sortie d'un composant analogique (par exemple un transistor ou un phototransistor), vous devrez toujours évaluer la tension qui est appliquée au circuit intégré dans tous les cas de figure possibles, afin d'être certain que la tension injectée demeure compatible (voir la fig. A-4 page 309).

En bref : les phototransistors

- Les phototransistors sont différenciés selon les longueurs d'onde, mesurées en nanomètres (abrégiés en nm), auxquelles ils sont sensibles.
- L'œil humain peut percevoir les ondes lumineuses comprises entre 380 nm et 750 nm.
- La lumière infrarouge a une longueur d'onde supérieure à 750 nm, l'ultraviolet inférieure à 380 nm. Des phototransistors sensibles aux ultraviolets existent mais ils sont peu courants.
- Les boîtiers des phototransistors infrarouges sont habituellement noirs.

Fondamentaux : photons et électrons

Le phototransistor utilise la lumière comme source d'énergie pour créer un flux d'électrons. Il existe plusieurs types de composants convertissant la lumière.

- Les *photodiodes* contiennent un semi-conducteur pouvant être pénétré par les photons (« particules de lumière »). Les photons arrachent quelques électrons des couches extérieures d'un semi-conducteur de type N, créant ainsi un champ électrique. La réponse est quasiment linéaire, rendant les photodiodes utilisables pour la mesure de la luminosité.
- Les *cellules photovoltaïques* sont des photodiodes de grandes dimensions.
- Les *phototransistors* fonctionnent selon le même principe que les photodiodes à l'exception du fait qu'ils utilisent une source d'alimentation continue externe qui favorise le flux d'électrons, qui est donc contrôlé par la lumière au lieu d'être créé par celle-ci.
- Les *phototransistors Darlington* sont organisés en double étage amplificateur, comme un transistor Darlington. Ils présentent une plus grande sensibilité à la lumière mais un temps de réponse plus lent.
- Les *photorésistances*, souvent appelées « cellules photoélectriques », voient leur résistance diminuée avec le flux lumineux.

En bref : le 555

L'Électronique en pratique comprend une section entière dédiée au temporisateur 555. Je vais me contenter de rafraîchir votre mémoire en résumant les quelques points importants.

Rôle des broches

Il est pratique de pouvoir prendre un 555 sans vous poser trop de questions selon que vous ayez besoin d'une seule impulsion ou d'un train d'impulsions pour tester un composant. Réexaminez la fig. 3-4 pour vous remémorer le nom des broches du temporisateur.

Circuit monostable

La fig. 4-3 ci-contre devrait vous permettre de vous rappeler les principaux comportements d'un temporisateur en mode monostable, également connu sous l'appellation mode mono-coup. Un front descendant

du signal appliqué sur la gâchette (trigger) génère un front montant sur la broche de sortie. La durée de l'impulsion est déterminée par la valeur de la résistance R1 et celle du condensateur C1, chargé par cette résistance. Si la broche de remise à zéro (reset) n'est pas utilisée, elle doit être reliée au pôle positif de l'alimentation afin d'éviter d'être activée par erreur.

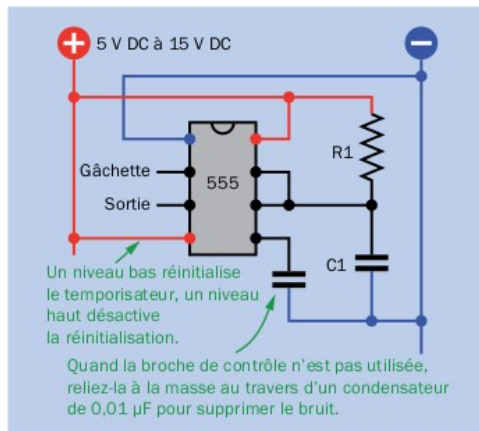


Figure 4-3. Schéma simplifié du montage d'un temporisateur 555 fonctionnant en mode monostable.

Durée de l'impulsion monostable

La fig. 4-4 contient une table de référence des durées d'impulsion en fonction de diverses valeurs de la résistance R1 et du condensateur C1, lorsque le temporisateur est utilisé en mode monocoup. Une table plus complète est disponible dans le livre *L'Électronique en pratique* ou dans les fiches techniques des fabricants.

Condensateur C1	Durée des impulsions selon la valeur de R1				
	10K	33K	100K	330K	1M
0,01 µF	0,00011	0,00036	0,0011	0,0036	0,011
0,1 µF	0,0011	0,0036	0,011	0,036	0,11
1 µF	0,011	0,036	0,11	0,36	1,1
10 µF	0,11	0,36	1,1	3,6	11
100 µF	1,1	3,6	11	36	110

Figure 4-4. Durée d'impulsion en secondes d'un temporisateur 555 fonctionnant en mode monostable.

Circuit astable

La fig. 4-5 rappelle le câblage permettant au temporisateur de fonctionner en mode astable (également appelé mode multivibrateur ou mode libre), générant une suite continue d'impulsions.

Dans cette configuration, le temporisateur démarre de lui-même et continue à fonctionner ainsi (a) tant qu'une tension d'alimentation lui est appliquée, et (b) tant que la tension appliquée à la broche de réinitialisation ne tombe pas à zéro.

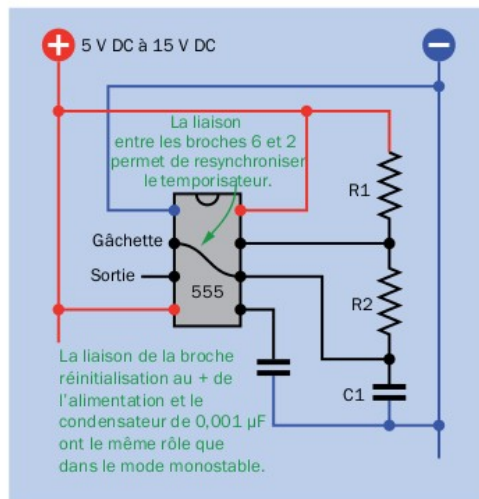


Figure 4-5. Schéma simplifié du montage d'un temporisateur 555 fonctionnant en mode astable.

Fonctionnement du mode astable

La fig. 4-6 page suivante montre le principe de fonctionnement du mode astable, le condensateur étant chargé par R1 et R2, il se décharge au travers de R2 dans le circuit intégré. Ceci explique pourquoi la durée « haute » de l'impulsion de sortie est toujours plus grande que la durée « basse ».

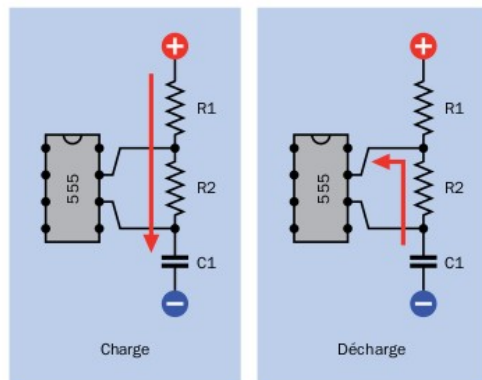


Figure 4-6. Principe de fonctionnement d'un temporisateur en mode astable, chargeant le condensateur C1 par R1 + R2 et le déchargeant au travers de R2.

Fréquence de sortie en mode astable

La fig. 4-7 présente une table de référence des fréquences en Hz, pour différentes valeurs de C1 et R2, considérant que R1 vaut 10K, lorsque le temporisateur est utilisé en mode astable. Vous pourriez utiliser des valeurs plus faibles pour R1 mais le circuit consommerait davantage de puissance.

Condensateur C1	Fréquence d'oscillation (Hz) selon la valeur de R2 (R1 = 10K)				
	10K	33K	100K	330K	1M
0,001 µF	48 000	19 000	6 900	2 200	720
0,01 µF	4 800	1 900	690	220	72
0,1 µF	480	190	69	22	7,2
1 µF	48	19	6,9	2,2	0,72
10 µF	4,8	1,9	0,69	0,22	0,072
100 µF	0,48	0,19	0,069	0,022	0,0072

Figure 4-7. Fréquences de sortie pour un temporisateur 555 fonctionnant en mode astable avec une valeur R1 fixe de 10K et diverses valeurs pour R2 et C1.

Temps de cycle total

Le temps de cycle total d'un temporisateur en mode astable est proportionnel à R1 + R2 + R2, parce qu'un cycle complet consiste en une impulsion haute plus le temps précédent la prochaine impulsion. Cela est illustré à la fig. 4-8.

Calcul de la fréquence

Si vous mesurez les valeurs de R1 et R2 en kilo-ohms (communément appelés kilohms), C1 étant mesuré en microfarads, vous pouvez calculer la fréquence F en hertz selon la formule suivante où R est égale à R1 + R2 + R2 :

$$F = 1\,440 / (R * C1)$$

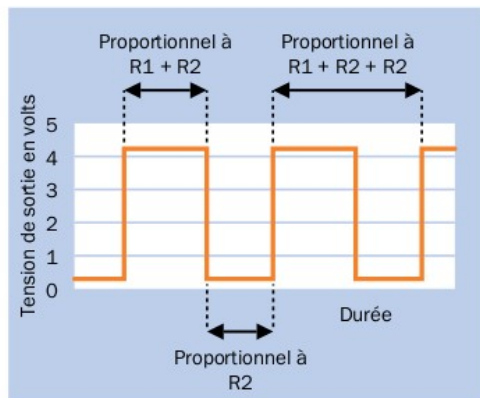


Figure 4-8. Représentation des durées des états « haut » et « bas » d'un temporisateur 555 (alimenté sous 5V DC) fonctionnant en mode astable, montrant pourquoi la durée totale d'un cycle est proportionnelle à R1 + R2 + R2.

Condensateurs de fortes valeurs

L'utilisation de condensateurs de fortes valeurs (disons au-delà de 470 µF) pourrait donner des résultats peu fiables, en raison des courants de fuite. Il s'agit d'un phénomène indésirable des condensateurs (particulièrement électrochimiques) dont les imperfections provoquent des pertes. Les courants de fuite des condensateurs de fortes valeurs peuvent devenir comparables à leurs courants de charge dans le cas où vous les chargez par une résistance élevée.

Mesure de la rapidité

Si vous souhaitez connaître la rapidité de fonctionnement de votre temporisateur, que celle-ci est supérieure à ce que vous pouvez mesurer avec un chronomètre et que vous n'avez pas d'oscilloscope, vous pouvez remplacer le condensateur de votre montage par un autre de valeur 10 ou 100 fois supérieure : dans ce cas, la durée des impulsions devrait augmenter dans

les mêmes proportions. Toutefois, les condensateurs étant fabriqués avec de larges tolérances d'une part, et en raison de leurs courants de fuite mentionnés précédemment d'autre part, une telle substitution ne produira que des résultats approximatifs.

Source d'alimentation

L'alimentation d'un 555 peut varier entre 5 V DC et 15 V DC sans que cela ne modifie la durée des impulsions de façon significative.

Tension de sortie

Le niveau haut de la sortie d'un 555 est légèrement inférieur à la valeur de sa tension d'alimentation. Si vous souhaitez piloter un circuit intégré logique, exigeant en ce qui concerne les niveaux haut et bas de ses entrées, vérifiez les niveaux de sortie du 555 en fonctionnement très lent (e.g. des impulsions de cinq secondes) permettant à votre multimètre d'effectuer ses mesures. Une résistance de 10K connectée au potentiel positif de l'alimentation ou à la masse peut être utilisée sur l'entrée d'un circuit logique.

Si ces rappels ne sont pas suffisamment clairs pour vous, reportez-vous au livre *L'Électronique en pratique*, à un autre ouvrage d'introduction ou aux fiches techniques des fabricants pour obtenir des éclaircissements.

En bref : les circuits CMOS et bipolaires

Le modèle original du 555 (toujours fabriqué) contient des transistors bipolaires. Il est souvent référencé comme circuit TTL et présente les caractéristiques suivantes.

- Il est peu sensible à l'électricité statique.
- Il accepte une large gamme de tension d'alimentation.
- Il supporte un courant de sortie jusqu'à 200 mA.
- Il génère des pics parasites lors des transitions de son signal de sortie.
- Il a une consommation relativement élevée.

Le type CMOS, plus moderne, a des caractéristiques différentes.

- Il est plus sensible à l'électricité statique.
- Il nécessite une gamme de tension d'alimentation moins large.
- Il ne peut pas accepter un courant de sortie important (sa valeur maximale dépend du fabricant).
- Il ne crée pas de pics parasites durant les transitions.
- Il utilise une puissance très faible.

De façon trompeuse, les versions CMOS et bipolaires peuvent toutes deux se nommer « temporisateur 555 » et leur références peuvent-être très voisines. Chez Texas Instruments par exemple, le TLC555-Q1 est un CMOS tandis que le NE555P est bipolaire. Encore plus gênant, certaines versions CMOS doivent être alimentées en 3,3 V DC alors que d'autres ont besoin de 5 V DC et d'autres encore acceptent une large gamme de tensions d'alimentation.

Lorsque vous achetez ces composants vous-même, lisez attentivement les fiches techniques. Un temporisateur de type CMOS ne serait pas capable d'alimenter le haut-parleur dans cette expérience.

Un son effrayant

Au lieu d'avoir recours à un phototransistor pour régler la tension de la broche de contrôle du temporisateur 555, on peut utiliser la sortie d'un autre 555 fonctionnant à une fréquence beaucoup plus faible. Cela modifie automatiquement les augmentations et diminutions de la fréquence du son.

Sur la fig. 5-1, le précédent schéma a été étendu vers le bas. (La fig. 5-2 correspond à la vue de la plaque de montage de ce circuit.) La sortie d'un second temporisateur est reliée à la broche de contrôle du premier, au travers d'un condensateur de liaison de $47\ \mu\text{F}$. Le condensateur de liaison sert à créer un son comparable à une sirène, vous le reconnaîtrez en l'entendant.

Le second temporisateur utilise une résistance de 150K pour charger le condensateur de temporisation de $1\ \mu\text{F}$ ou $10\ \mu\text{F}$ selon votre préférence. Essayez d'abord un condensateur de $10\ \mu\text{F}$. Ceci permettra au second temporisateur de fonctionner à environ un cycle par seconde. Initialement, cela n'a aucun effet sur le premier 555, mais la sortie du second charge lentement le condensateur de liaison de $47\ \mu\text{F}$, causant ainsi une lente augmentation de la tonalité générée par le premier 555. Le second timer atteint alors la fin de son impulsion de sortie « haute » et bascule vers son état « bas ». À ce point, le condensateur de liaison se décharge et la fréquence du premier temporisateur diminue.

J'avais inclus un circuit de ce type dans l'expérience 17 du livre *L'Électronique en pratique*, mais le son produit était différent. Comparez ce schéma avec celui de cette expérience et voyez si vous pouvez en trouver la raison.

Sur la fig. 5-1, si vous remplacez le condensateur de temporisation de $10\ \mu\text{F}$ par celui de $1\ \mu\text{F}$, tout se passe dix fois plus rapidement, et vous percevez le son typique d'une sirène de système d'alarme. (C'est ce que

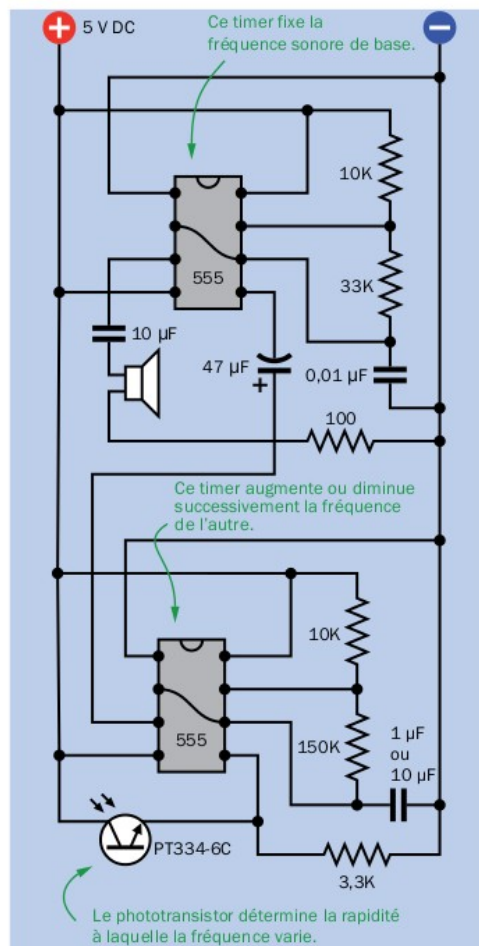


Figure 5-1. En utilisant un second 555 pour ajuster la tension de la broche de contrôle du premier timer, vous pouvez obtenir un son réellement désagréable.

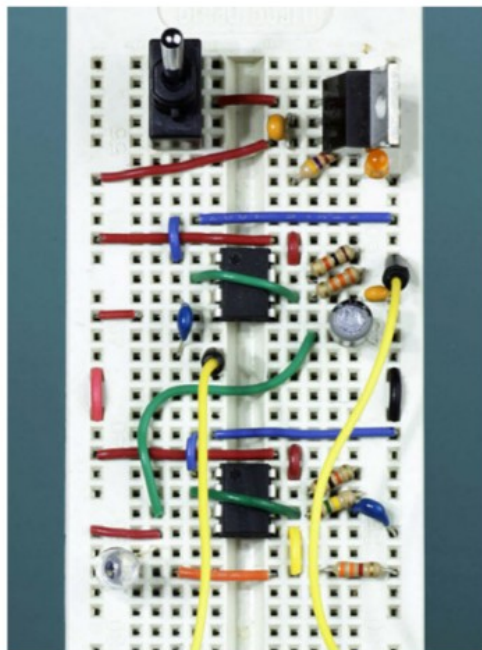


Figure 5-2 Le schéma avec deux temporisateurs réalisé sur une plaque de montage.

je voulais dire dans le nom de cette expérience). Vous pouvez essayer différentes valeurs pour le condensateur et les résistances de temporisation, et modifier la valeur du condensateur de liaison afin d'obtenir les sons les plus désagréables possibles.

Le phototransistor offre de nombreuses possibilités. Faites varier la lumière qui l'atteint et constatez ce qui se passe si vous déplacez vos doigts au-dessus pour changer la lumière rapidement. Que pourriez-vous réaliser en utilisant deux phototransistors pour ajuster la tension de chacune des broches de contrôle des deux temporisateurs ?

Pour aller plus loin

Plusieurs variantes du temporisateur 555 ont été créées afin de contourner les limites que j'ai mentionnées à la fin de l'expérience précédente.

- Le 7555 a le même brochage mais consomme moins d'énergie et peut fonctionner avec une tension d'alimentation aussi faible que 2 V DC. De plus, il génère moins de bruit dans le circuit. La tension d'alimentation maximale et le courant de sortie maximal varient selon le fabricant.
- Le 4047B apporte des fonctionnalités supplémentaires qui le rendent plus polyvalent. Une broche de gâchette répond à un front descendant ; une autre à un front montant. Il possède également une seconde sortie complémentaire, l'une étant haute alors que l'autre est au niveau bas. Ce temporisateur fonctionne en mode monostable ou en mode multivibrateur selon l'état d'une autre broche. Sa gamme de tensions d'alimentation est identique à celle d'un 555.
- Le 74HC221 est un temporisateur à double monostable. En d'autres mots, il contient deux timers, chacun fonctionne en mode monostable. En les reliant de façon à se commander l'un l'autre, on obtient un signal pulsé continu dont on peut ajuster séparément la durée haute et basse des impulsions. Sa tension d'alimentation maximale est de 7 V DC mais il est plutôt étudié pour fonctionner sous 5 V DC.
- Le 4528B est un double monostable utilisant un concept similaire à celui du 74HC221, mais il s'agit d'un composant CMOS qui admet une large gamme de tensions d'alimentation (jusqu'à 15 V DC).
- Les composants 74HC123, 74HC423, 74HC4538 et 4098B sont d'autres temporisateurs monostables fonctionnant selon le même principe général, mais possédant des spécifications légèrement différentes.
- Le 556 est un double temporisateur comprenant deux 555 dans un seul composant. Ils peuvent être utilisés pour se déclencher l'un l'autre, mais ils ont les limites connues du 555 classique. Le 556 n'est plus aussi populaire que précédemment et il risque de devenir difficile à trouver. Pour cette raison et parce qu'il est plus pratique de placer un seul temporisateur exactement là où vous en avez besoin, les 556 ne sont pas utilisés dans ce livre.
- Pour finir, le 74HC555 contient un compteur de 24 bits permettant de diviser la fréquence d'horloge par une valeur allant jusqu'à 16 millions, d'étendre la temporisation à plusieurs jours si vous

le souhaitez. Un oscillateur à quartz externe peut y être adjoint pour une meilleure précision que celle d'un oscillateur à résistance-condensateur. Cependant, l'utilisation d'un oscillateur à quartz réduira la largeur maximale des impulsions à moins d'utiliser deux timers en chaîne, l'un pilotant l'autre et vice versa.

Avec autant de variantes, chacune renforçant les possibilités absentes du 555, pourquoi le vieux 555 bipolaire reste-t-il toujours si populaire ? Probablement parce qu'il est familier à tout le monde. Tout comme un clavier

AZERTY, ce n'est pas l'idéal mais nous savons tous l'utiliser. De plus, l'ancienne version bipolaire à broches traversantes peut fournir plus de courant de sortie que ses successeurs, ce qui est pratique pour réaliser rapidement des circuits simples. Et il est peu coûteux !

Vous pourriez envisager d'essayer les variantes proposées. Personnellement, je ne me suis jamais lassé de jouer avec des temporisateurs, tellement ces composants simples offrent de possibilités. Mais il est temps d'avancer, nous avons un nouveau composant à étudier : le comparateur.

Marche-arrêt simple et sûr

Dans les deux précédentes expériences, vous avez appris qu'un phototransistor adaptait son niveau de sortie proportionnellement à la quantité de lumière qui l'atteignait. C'est une fonction utile, mais pas aussi utile qu'elle pourrait l'être. Pour des raisons pratiques, on a souvent besoin de dispositifs sensibles à la lumière qui présentent deux états distincts précisément définis : « marche » et « arrêt ». Une alarme d'intrusion, par exemple, déclenchée par quelqu'un interrompant un faisceau électrique, doit fournir un signal clair. Ce ne peut être un fonctionnement progressif ou intermittent. Y a-t-il une façon de convertir la sortie graduelle d'un phototransistor en un signal clairement défini ? Un comparateur conviendrait parfaitement.

Comparaisons

Construisons le schéma de la fig. 6-1. Le potentiomètre de 500K est un modèle ajustable que vous insérez dans votre plaque de montage. Le phototransistor est relié en série à une résistance de 3K3 comme précédemment, exception faite de la sortie de l'émetteur qui est reliée au travers d'une résistance de 100K à l'entrée d'un circuit intégré LM339. Ce circuit contient un comparateur, en fait il en intègre quatre mais nous n'en utiliserons qu'un seul. Pour cette expérience, les autres comparateurs peuvent demeurer non connectés.

Réglez le potentiomètre à mi-course. Commencez en couvrant le phototransistor afin qu'il ne soit pas éclairé. Permettez ensuite à la lumière de pénétrer, vous devriez voir la LED s'allumer. Diminuez la lumière à nouveau, la LED doit s'éteindre. Le potentiomètre de 500K fixe la tension de référence du comparateur. Quand le curseur du potentiomètre se trouve au milieu de sa course, la tension de référence est d'environ 2,5 V, le potentiomètre se comportant comme un diviseur de tension entre le pôle positif de l'alimentation et la masse.

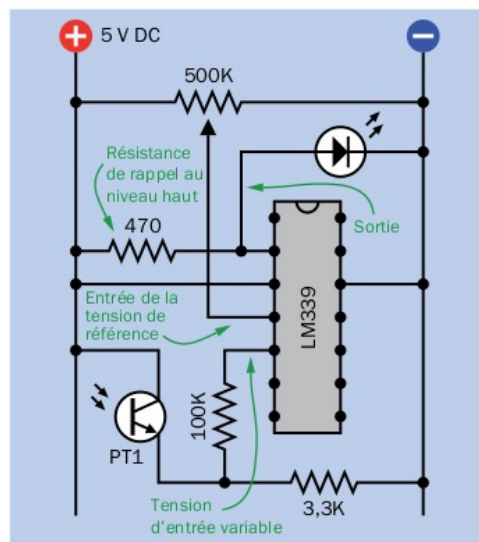


Figure 6-1. Schéma initial d'un circuit utilisant un comparateur pour allumer une LED en réponse à la lumière captée par un phototransistor.

Réglez le potentiomètre à mi-course. Commencez en couvrant le phototransistor afin qu'il ne soit pas éclairé. Permettez ensuite à la lumière de pénétrer, vous devriez voir la LED s'allumer. Diminuez la lumière à nouveau, la LED doit s'éteindre. Le potentiomètre de 500K fixe la tension de référence du comparateur. Quand le curseur du potentiomètre se trouve au milieu de sa course, la tension de référence est d'environ 2,5 V, le potentiomètre se comportant comme un diviseur de tension entre le pôle positif de l'alimentation et la masse.

En lumière faible, la tension de l'émetteur du phototransistor est inférieure à 2,5 V, bloquant le comparateur. Au fur et à mesure que la luminosité augmente, la tension d'émetteur du phototransistor augmente puis dépasse 2,5 V (vous rappelez-vous pourquoi ?). Le comparateur détecte alors cette différence et change l'état de sa sortie. La résistance de 100K sera utile quand nous ajouterons d'autres composants à l'étape suivante. L'impédance d'entrée du comparateur étant très élevée, la résistance modifie de façon importante le potentiel détecté par le circuit intégré.

Maintenez une lumière modérée sur le phototransistor et faites varier le potentiomètre. La LED s'éteint car vous modifiez la tension de référence que le comparateur détecte.

En bref: les comparateurs

- Un comparateur effectue la comparaison entre une *tension variable* appliquée à l'une de ses entrées et une *tension de référence* présente sur l'autre entrée.
- Un potentiomètre peut être utilisé pour fixer la tension de référence.

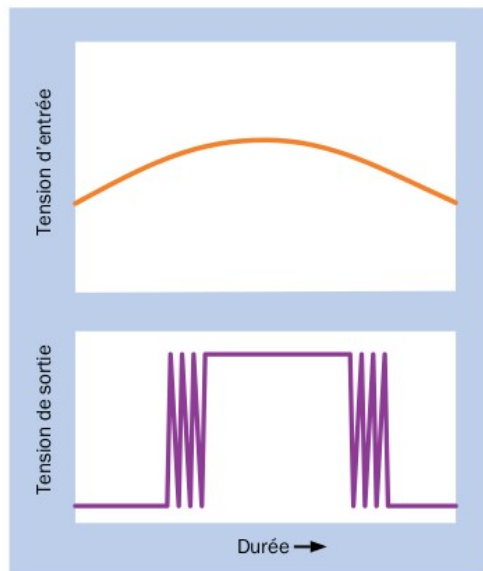


Figure 6-2. Lorsqu'un comparateur reçoit une tension changeant lentement (en haut), sa sortie a tendance à osciller de façon imprévisible entre les états « haut » et « bas ».

Parfait. Mais un problème apparaît si la lumière varie légèrement autour du point où la LED s'allume ou s'éteint. Pour constater cela, commencez à placer le phototransistor dans la pénombre puis, augmentez la luminosité jusqu'à ce que la LED s'allume. Diminuez maintenant la luminosité jusqu'à atteindre une très faible quantité, la LED devrait clignoter.

Cette oscillation, représentée sur la fig. 6-2, correspond à une incertitude du comparateur à déterminer s'il doit être à l'état bloqué ou passant.

Comment pouvons-nous nous prémunir de cela ? La réponse est d'utiliser une technique très puissante appelée *contre-réaction positive* ou *réaction*.

La réaction

Sur la fig. 6-3, il s'agit du même circuit que précédemment, toutefois, un potentiomètre a été ajouté à droite. La fig. 6-4 ci-contre montre la réalisation de ce circuit sur une plaque de montage.

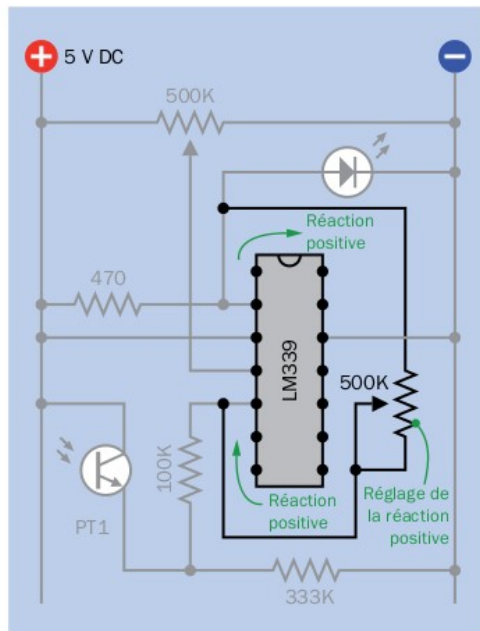


Figure 6-3. Le comparateur de base a été modifié afin de rationaliser sa sortie, en ajoutant une réaction. Le précédent câblage est en gris.

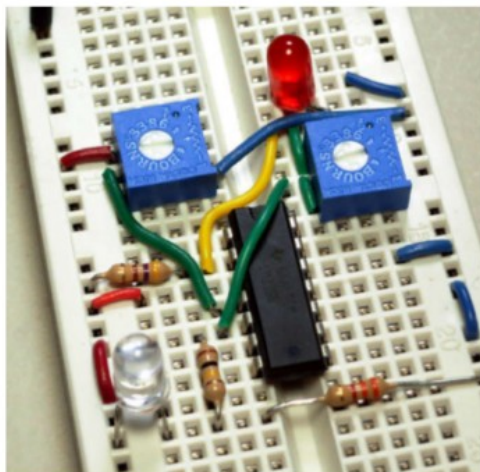


Figure 6-4. Montage du comparateur à contre-réaction positive avec deux potentiomètres ajustables, le phototransistor en bas à gauche et la diode LED indiquant l'état de sortie.

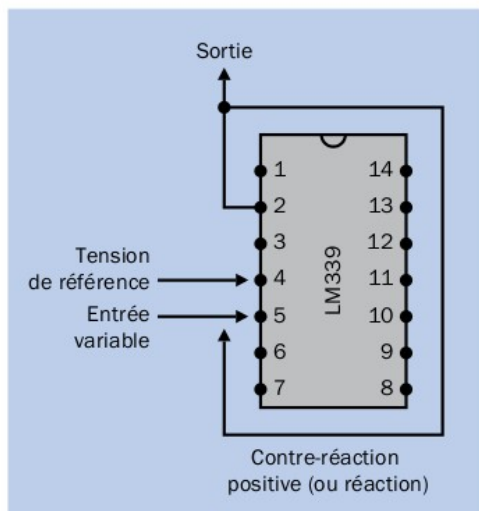


Figure 6-5. Principe de la contre-réaction positive.

Le principe du circuit est expliqué sur la fig. 6-5. Remarquez que la broche 2 du comparateur est reliée à la broche 5. La patte 2 est la sortie (rappelez-vous qu'elle contrôle la LED). La broche 5 est l'entrée variable à laquelle le phototransistor est relié au travers de la résistance de 100K. Ainsi, le second potentiomètre sur la fig. 6-3 absorbe en partie la tension réinjectée par la sortie vers l'entrée. C'est la contre-réaction positive ou réaction.

Les deux potentiomètres étant à peu près réglés à mi-course, si vous faites varier légèrement la quantité de lumière qui atteint le phototransistor (comme précédemment), vous devriez constater que la LED ne clignote plus. Elle est soit allumée, soit éteinte.

La contre-réaction positive fonctionne de la façon suivante.

- Quand le niveau de la sortie augmente, il est réinjecté à l'entrée par la boucle de contre-réaction et s'ajoute au niveau de cette entrée.
- Le niveau de l'entrée augmente ce qui renforce la sortie.
- La sortie atteignant le niveau le plus haut est ajoutée au niveau d'entrée, renforçant davantage son niveau haut.

Cela se passe très rapidement, ainsi la LED s'allume et reste allumée. Ensuite, si la lumière éclairant le phototransistor diminue, rien ne se passe car la tension réinjectée par la sortie est suffisante pour maintenir l'entrée suffisamment haute. Maintenant, si la lumière continue à s'affaiblir, voici ce qui se produit.

- Le niveau d'entrée diminuant provoque une diminution du niveau de sortie.
- La contre-réaction de la sortie diminue, ne renforçant plus le niveau de l'entrée.
- Privé de la tension réinjectée par la sortie, le niveau d'entrée diminue fortement et le comparateur se bloque.

Cela se passe très rapidement, la LED s'éteint instantanément au lieu de s'affaiblir ou de clignoter.

L'hystérésis

Ajustez le potentiomètre de droite afin de diminuer sa résistance. Cela va renforcer la contre-réaction dont l'effet sera ainsi plus visible.

Modifiez maintenant très lentement la quantité de lumière éclairant le phototransistor. Si vous utilisez votre lampe de bureau, placez votre main près de la lampe afin de créer une zone d'ombre au contour très progressif. Vous devriez constater, lorsque l'allumage de la LED se produit, que vous pouvez réduire légèrement la lumière atteignant le phototransistor sans provoquer d'extinction de la LED. Vous pouvez imaginer que le comparateur devient « collé » car il se maintient en cet état. Lorsque finalement il se bloque, il demeure également « collé » à cet état. La fig. 6-6 illustre ce comportement.

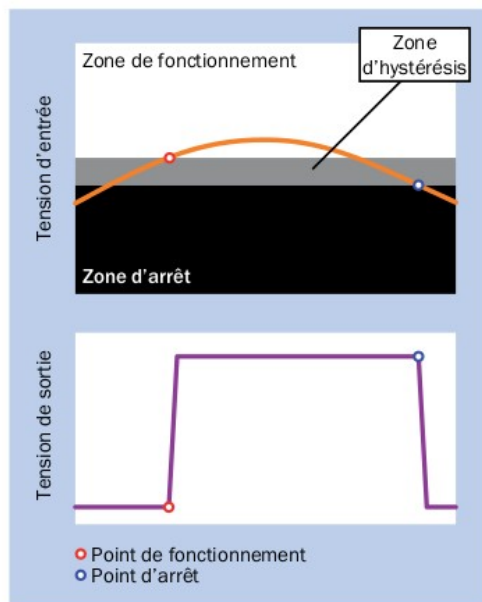


Figure 8-6. En contre-réaction positive, la sortie d'un comparateur tend à coller à l'état haut ou bas. La zone de « collage » est appelée zone d'hystérésis.

Ce phénomène très important est appelé *hystérésis*. Supposez que vous utilisiez un phototransistor pour allumer une lampe au crépuscule. La luminosité fluctue légèrement lorsqu'un nuage passe. Voudriez-vous alors que la lampe s'allume puis s'éteigne ainsi à chaque légère variation de la luminosité ? Non, bien sûr, vous souhaitez que la lampe reste allumée ou éteinte sans réagir à de petits mouvements de luminosité.

Imaginez maintenant qu'un thermostat contrôle votre chauffage. Vous souhaitez que celui-ci se déclenche quand la température de la pièce descend en dessous de 20°C . Une fois enclenché, vous ne voudriez pas que le chauffage s'arrête sous prétexte que quelqu'un passe près du thermostat, lui envoyant un courant d'air un peu plus chaud. Votre chauffage doit fonctionner tant que la température n'atteint pas par exemple 22°C et reste éteint tant que celle-ci ne descend pas à nouveau en dessous de 20°C . Dans ce cas, la plage d'hystérésis s'étend de 20°C à 22°C .

La plage d'hystérésis peut être ajustée en réglant la valeur de la contre-réaction positive appliquée au comparateur. Une plus faible résistance augmentera la contre-réaction, permettant au comparateur d'ignorer des variations plus importantes de ses entrées, délivrant alors un signal plus stable, comme le montre la fig. 6-7.

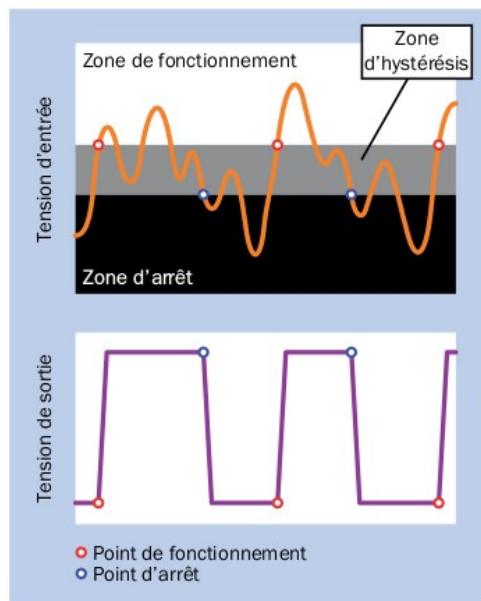


Figure 8-7. L'augmentation de la contre-réaction positive d'un comparateur crée plus d'hystérésis lui permettant d'ignorer les variations substantielles d'un signal instable.

La partie basse de la figure montre la sortie du comparateur telle que nous la souhaitons, ignorant tous les frémissements du signal d'entrée. Le comparateur igno-

ra simplement toute variation dans la zone grise et ne réagira que lorsque le signal sort la zone grise pour entrer dans la zone de fonctionnement ou au contraire en entrant dans la zone d'arrêt.

Vous devez savoir que l'hystérésis est représentée en utilisant une courbe comme sur la fig. 6-8. C'est le graphique que vous retrouverez dans la plupart des ouvrages d'électronique, certes un peu difficile à interpréter. La partie droite de la courbe montre la tension de sortie du comparateur (axe vertical) quand celle de l'entrée augmente progressivement (axe horizontal) de gauche à droite. Le comparateur attend un peu avant de basculer à l'état de fonctionnement. Ensuite, si la tension d'entrée diminue progressivement, la courbe de gauche révèle que le comparateur attend avant d'arrêter l'appareil.

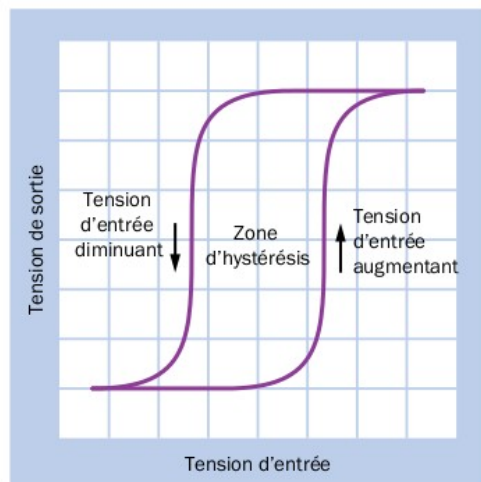


Figure 6-8. Manière usuelle de décrire l'hystérésis.

Le symbole

Découvrons maintenant quelques détails supplémentaires concernant le comparateur. Tout d'abord, son symbole est présenté sur la fig. 6-9. Le comparateur nécessite sa propre alimentation, comme tout circuit intégré logique. J'ai illustré cela à l'aide des signes + et -, mais, il arrive souvent que l'alimentation d'un

comparateur ne soit pas représentée sur les schémas. En effet, chacun connaissant son existence, le dessinateur ne se préoccupe pas de l'inclure.

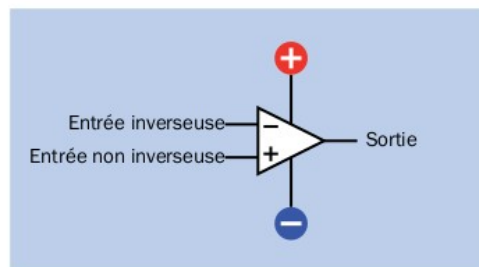


Figure 6-9. Schéma simplifié d'un comparateur. L'alimentation est toujours nécessaire mais n'est pas toujours représentée sur un plan.

La tension de référence de votre circuit était appliquée sur l'entrée inverseuse du comparateur. L'entrée non inverseuse étant utilisée pour la tension issue du phototransistor. J'expliquerai un peu plus loin pourquoi ces entrées sont appelées ainsi. Sur la fig. 8-9, les deux entrées ont leur propre signe + et -, ce qui est source de confusion car vous n'êtes pas supposé leur appliquer une tension positive ou négative.

En bref : les signes + et -

- Le comparateur bascule à l'état de fonctionnement lorsque son entrée + devient plus positive que son entrée -. L'entrée + est appelée entrée *non inverseuse*.
- De façon identique, le comparateur bascule à l'état de fonctionnement lorsque son entrée - devient plus négative que son entrée +. L'entrée - est appelée entrée *inverseuse*.

La sortie

J'ai déjà évoqué la sortie d'un comparateur. En réalité, beaucoup de comparateurs ne créent pas une sortie haute ou basse. Ils ont une sortie à *collecteur ouvert* comme représenté sur la fig. 6-10 page suivante.

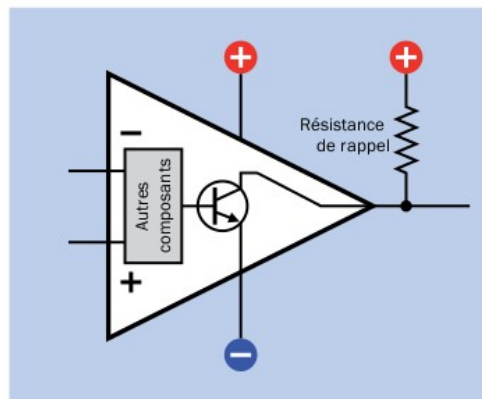


Figure 6-10. Vue simplifiée des éléments internes d'un comparateur. Les deux tensions positives ne sont pas nécessairement identiques mais doivent être relatives à une même masse.

Un comparateur contient divers composants, celui qui nous intéresse ici est le transistor de sortie, souvent de type bipolaire. Quand le transistor est passant, il conduit le courant, absorbant l'intensité traversant la résistance de rappel externe et l'écoulant vers la masse. Il dérive également toute intensité qui serait apportée par un composant externe. Cela fait apparaître le comparateur comme s'il avait une sortie au niveau bas.

Quand le transistor est bloqué, il ne conduit plus le courant. L'intensité traversant la résistance de rappel ne peut plus s'écouler par le comparateur, elle s'écoule donc dans tout composant externe qui est relié à sa sortie. Le comparateur apparaît cette fois comme s'il avait une sortie de niveau haut.

La fig. 6-11 représente graphiquement le fonctionnement du comparateur.

En pratique, il n'est pas nécessaire de vous rappeler comment le transistor interne du comparateur se comporte. Vous devez juste mémoriser que le niveau « haut » de la sortie est fourni par la résistance de rappel, tandis que le niveau bas signifie que le comparateur absorbe le courant.

Sur la fig. 6-1, vous vous interrogez peut-être sur la raison pour laquelle je n'avais pas représenté la LED en série avec une résistance comme habituellement. C'est

simplement parce que le LM339 possède une sortie à collecteur ouvert. De ce fait, la LED est réellement alimentée au travers de la résistance de rappel de 470 Ω .

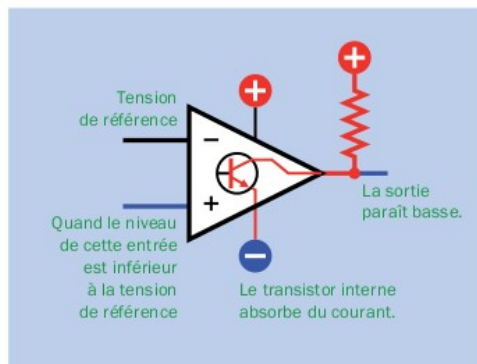
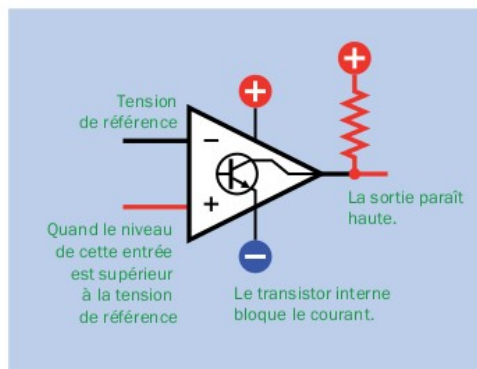


Figure 6-11. Quand un comparateur est utilisé en mode non inverseur (tension d'entrée appliquée à son entrée + ou non inverseuse) sa sortie se comporte comme ci-dessus.

Il est maintenant temps de résumer ce que nous savons sur la sortie.

En bref : plus d'infos sur les comparateurs

- Vous devez inclure une résistance de rappel vers le positif de l'alimentation à la sortie d'un comparateur s'il possède une sortie à collecteur ouvert ou un drain ouvert. Dans le cas contraire, le comparateur ne fonctionnera pas. Vérifiez cela sur la fiche technique du comparateur que vous utilisez.

- Si vous utilisez une résistance de rappel de faible valeur, une intensité plus forte traversera le comparateur, vous pourriez le griller. En cas de doute, vérifiez l'intensité traversant la résistance de rappel depuis la broche de sortie du comparateur grâce à votre multimètre.
- La plupart des comparateurs doivent être reliés à des composants présentant une forte impédance d'entrée comme les circuits intégrés logiques. Cette catégorie de composants nécessite un très faible courant, vous pouvez donc recourir à une résistance de rappel de valeur relativement élevée, habituellement 5K. La résistance de 470 Ω utilisée dans le schéma de la fig. 6-3 est relativement faible car le comparateur doit piloter une LED.
- Un comparateur ne peut pas absorber un courant supérieur à 20 mA. Vous pouvez ajouter un transistor externe à la sortie si vous devez absorber un courant plus important.

Attention, le point suivant est très important, il s'agit d'un nouveau concept.

- La tension positive alimentant la résistance de rappel ne doit pas nécessairement être la même que celle alimentant le comparateur, à condition qu'elles partagent le même potentiel de masse. Par exemple, vous pourriez avoir une alimentation de 5 VDC par rapport à la masse pour le comparateur, et une résistance de rappel reliée à une alimentation de 9 VDC par rapport à cette même masse. De ce fait, un comparateur peut fonctionner comme un amplificateur de tension.

Très intéressant ! Nous savons maintenant comment amplifier un courant à l'aide d'un transistor et une tension à l'aide d'un comparateur. Cette information pourrait nous être très utile pour le futur.

Soyez simplement attentif à ne jamais absorber trop de puissance au travers de ce transistor interne. Les fiches techniques vous préciseront les limites à respecter.

À l'intérieur du circuit intégré

Dans le cadre de cette expérience, j'ai utilisé un LM339, l'un des plus anciens comparateurs, toujours très utilisé et très économique ! Sur la fig. 6-12, vous constatez qu'il s'agit en fait d'un *quadruple comparateur* ce qui signifie qu'il contient quatre comparateurs, un seul étant utilisé (pour l'instant) dans cette expérience.

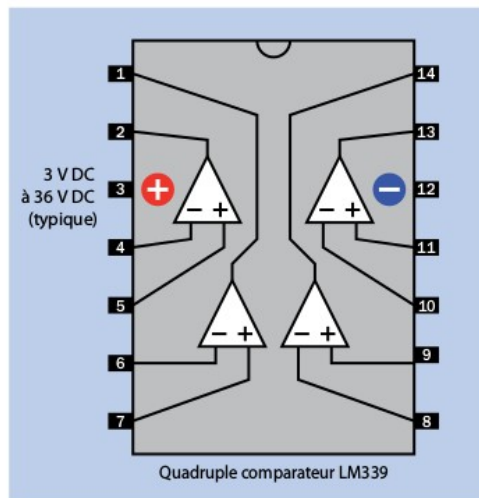


Figure 6-12. Quatre comparateurs sont présents à l'intérieur du circuit intégré LM339.

Le circuit redessiné

Le schéma que je vous ai montré à la fig. 6-3 a été conçu afin de faciliter son transfert sur une plaque de montage. Mais certaines personnes ne vous simplifieront pas le montage d'un circuit sur une platine. Elles ont pour habitude de placer la tension d'alimentation positive en haut de leur schéma, le pôle négatif de la masse en bas, l'entrée à gauche et la sortie à droite. Cette convention offre une meilleure compréhension d'un circuit lorsqu'on l'observe pour la première fois. La fig. 6-13 page suivante est un exemple de schéma conventionnel utilisant un comparateur. Les composants et les connexions sont en fait les mêmes que sur la fig. 6-3.

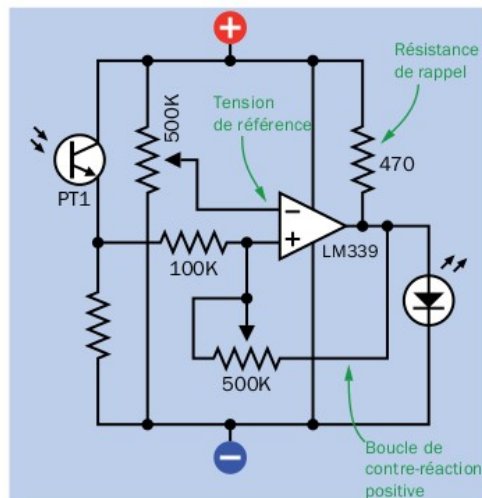


Figure 6-13. Schéma plus conventionnel d'un circuit comparateur à contre-réaction positive.

Et son principe de fonctionnement est représenté sur la fig. 6-14.

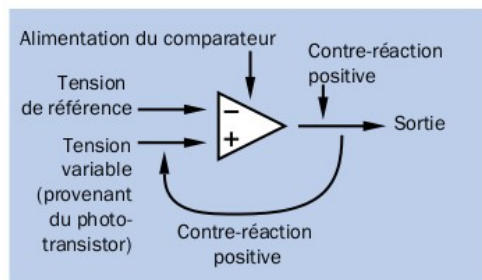


Figure 6-14. Concept de base de l'hystérésis dans un circuit à contre-réaction positive.

Attention: comparateurs inversés

Dans ce livre, je montre toujours les comparateurs (et plus tard les amplificateurs opérationnels) avec l'entrée non inverseuse « plus » située sous l'entrée inverseuse « moins ». C'est la convention la plus courante que vous pourriez trouver dans des schémas obtenus par ailleurs, mais ce n'est pas une règle universelle. Parfois le dessinateur d'un schéma considère qu'il est plus pratique de placer l'entrée non inverseuse au-dessus de

l'entrée inverseuse, parce que cela diminue le nombre de croisements des connexions ou permet de placer les composants plus près les uns des autres.

Cela peut être trompeur. Vous devez absolument faire attention de bien noter la position exacte des entrées + et -. Si vous ne remarquez pas qu'un comparateur a été représenté à l'envers, votre circuit se comportera à l'opposé de ce que vous en attendez.

Comparaison avec un microcontrôleur

Les circuits intégrés comparateurs sont un peu de la vieille école. De nos jours, on a plutôt l'habitude de s'orienter vers l'utilisation d'un microcontrôleur pour traiter une variable d'entrée et en déduire un état marche ou arrêt.

Beaucoup de microcontrôleurs incluent un ou plusieurs convertisseurs analogiques-numériques (également appelés convertisseurs analogiques-numériques ou convertisseur A/N et abrégés par ADC ou CAN ou encore A/D). De façon classique, chaque CAN possède sa propre broche d'entrée. Il accepte une tension variable et la convertit en une valeur numérique entière (un nombre sans décimale) compris entre 0 et 1 000 voire davantage.

Si vous alimentez un phototransistor en 5 V DC comme suggéré dans cette expérience, sa sortie devrait être compatible avec l'entrée d'un microcontrôleur 5 V DC. Cela paraît simple et facile : reliez simplement le phototransistor au microcontrôleur (en fait vous pourriez le faire au travers d'une résistance de 5K ou 10K afin de protéger l'entrée du microcontrôleur. L'entrée du microcontrôleur ayant une impédance très élevée, la résistance ne fera pas chuter la tension d'entrée de façon significative). L'opération suivante consisterait à exposer le phototransistor à une luminosité moyenne entre ombre et pleine intensité pour établir le point de transition. Au-dessus de ce seuil, le microcontrôleur exécutera une action, en dessous, il stoppera cette action.

Au point de transition, vous devrez déterminer quelle valeur le CAN du microcontrôleur génère. Pour cela, le plus simple sera de connecter au microcontrôleur un afficheur numérique et d'écrire un petit programme qui affichera la valeur sur l'afficheur.

Vous pourrez alors écrire un nouveau programme contenant une instruction conditionnelle indiquant au microcontrôleur de faire l'action souhaitée si la luminosité est au-dessus du seuil de transition et la stopper si elle est inférieure.

Cela ne paraît pas être un travail énorme. Cependant, si vous changez d'avis au sujet de la valeur de transition, vous devrez réécrire votre programme et le réinstaller à nouveau dans votre microcontrôleur. C'est clairement plus pénible que de devoir simplement retoucher le réglage d'un potentiomètre ajustable.

De plus, vous voulez une hystérésis, n'est-ce pas ? Pour cela, vous devrez définir deux niveaux de luminosité afin d'établir les limites haute et basse de la zone grise dans laquelle le microcontrôleur devra ignorer les petites variations d'illumination. Le principe consistera, pour le programme, à dire au microcontrôleur, « si la luminosité augmente au-dessus de cette valeur haute, commence à faire l'action; si la luminosité diminue sous cette autre valeur basse, cesse l'action, et si la luminosité se situe entre les deux, continue sans rien changer ».

Le vrai problème, une fois de plus, se posera si vous changez d'avis et désirez apporter des modifications. Supposez que vous placiez votre microcontrôleur dans un circuit utilisant un phototransistor pour allumer un éclairage extérieur au crépuscule, et l'éteindre à l'aube. Vous aurez besoin d'une hystérésis afin d'éviter que l'éclairage ne clignote en réponse à de petites variations de luminosité dues à diverses raisons comme le passage de nuages alors que la lumière du jour est encore faible. Comment pouvez-vous résoudre cela sur votre table de travail ? Eh bien, vous ne pouvez pas. Vous devez assembler votre circuit, l'installer ensuite à l'endroit où vous devrez l'utiliser, et constater comment il se comporte. Pour ajuster l'hystérésis, vous devrez alors utiliser votre ordinateur pour installer une nouvelle version de votre programme dans laquelle vous aurez défini de nouvelles valeurs haute et basse de la luminosité.

Cela ne me semble pas très excitant.

Les microcontrôleurs sont indispensables dans de nombreuses situations, mais il sera parfois plus pratique d'utiliser un circuit analogique bâti autour d'un circuit intégré ne coûtant pas 1 € pour réaliser simplement la fonction attendue.

Pour aller plus loin : système de sécurité basé sur un laser

Vous possédez maintenant toutes les connaissances en électronique nécessaires pour créer un système de protection périphérique utilisant le circuit que vous venez de réaliser, en vous servant d'un crayon pointeur laser, peu coûteux, qui reflète son faisceau à chaque coin de la zone à protéger. Au lieu d'utiliser une LED reliée à la sortie du comparateur, vous connectez la base d'un transistor 2N2222 qui pilote la bobine d'un relais qui déclenche une alarme sonore ou vous prévient plus discrètement en cas d'intrusion.

Si vous souhaitez un système plus élaboré, vous pouvez utiliser plusieurs couples laser-phototransistor afin de déterminer la zone concernée, si l'un d'entre eux provoque un déclenchement. Rappelez-vous que chaque LM339 possède quatre comparateurs et qu'ils peuvent fonctionner indépendamment les uns les autres.

Pour que le système fonctionne correctement, vous devez placer chaque phototransistor dans une boîte comportant un seul petit trou laissant entrer le faisceau laser. De cette façon, le phototransistor est protégé de la lumière ambiante et le système peut fonctionner nuit et jour. Même ainsi, vous devez pouvoir ajuster la sensibilité du phototransistor et la plage d'hystérésis. La meilleure façon de procéder est de provoquer des vraies et fausses détections.

Combien d'autres applications pouvez-vous imaginer en utilisant un phototransistor ? Si vous faites travailler votre imagination, je suis certain que vous trouverez de multiples idées. Ma préférée est l'interrupteur de lampe chronophotonique que vous trouverez dans l'expérience suivante.

Interrupteur chronophotonique

Cette expérience utilise les connaissances acquises précédemment, relatives aux transistors, aux phototransistors, aux temporisateurs 555 et aux comparateurs. En effet, nous avons une bonne raison de mettre à profit toutes ces informations : vous êtes maintenant à même d'utiliser vos connaissances pour réaliser un gadget possédant une réelle utilité pratique. De plus, vous aurez le plaisir d'ouvrir un réveil électronique, d'apprendre comment il fonctionne et d'en modifier le comportement d'origine.

Une version légèrement différente et plus courte de ce projet a déjà été publiée dans le magazine *Make*, mais j'avais dû omettre beaucoup d'explications par manque de place. Cette nouvelle version comporte plusieurs améliorations ; elle est beaucoup plus détaillée, devrait être plus facile à comprendre et pouvoir fonctionner avec une plus grande diversité de réveils.

L'objectif est assez simple : créer un appareil qui va allumer ou éteindre une lampe dans votre logement alors que vous êtes absent. Vous pouvez bien entendu acheter divers dispositifs peu coûteux pouvant simuler votre présence à domicile mais selon moi, ils ne remplissent pas correctement leur rôle. Là où je vis, le soleil se couche deux heures plus tôt l'été que l'hiver et, si j'utilise un programmeur horaire pour simuler ma présence, je dois modifier son réglage plusieurs fois par an.

En réalité, la lampe devrait s'allumer en fonction de la diminution de luminosité du crépuscule, un phototransistor couplé à un comparateur peut être adapté pour cela. Vous pouvez également acheter un gadget qui remplira ce rôle mais il éteindra la lampe après un temps prédéterminé. Cela me paraît inapproprié. La plupart des gens vont se coucher à peu près à la même heure chaque jour. Cependant, ils n'éteignent pas leur éclairage plus tardivement si le soleil s'est couché plus tard.

Pour être plus réaliste, la lampe devrait donc s'éteindre chaque nuit à la même heure.

Voici les spécifications de cette sorte de contrôleur d'éclairage : il devra utiliser un capteur de luminosité pour allumer la lampe et un temporisateur pour l'éteindre. Un tel appareil existe-t-il ? Apparemment non. C'est pourquoi j'ai créé le contrôleur d'éclairage chronophotonique, je n'avais pas d'autre choix.

Attention: évitez les tensions dangereuses

Ce circuit est capable de piloter une lampe d'éclairage de 60 W alimentée par le secteur électrique. Si c'est ce que vous souhaitez faire, je ne peux pas vous en dissuader, mais je pense qu'il serait plus judicieux d'utiliser une lampe LED de 12 V ou une lampe halogène de 12 V. Le secteur électrique 220 V AC est réellement très dangereux. Si vous êtes un jeune lecteur, merci de demander l'autorisation à vos parents avant de continuer. Peu importe votre âge, vous pouvez toujours commettre une erreur et votre vie sera prolongée si vous le faites en manipulant des tensions plus faibles que celle du secteur électrique.

Si vous voulez néanmoins interrompre le courant du secteur, un bon compromis serait de vous procurer un appareil conçu pour cela comme le relais *Powerswitch tail PN PS-240*, qui est un relais isolé permettant d'interrompre en sécurité un appareil connecté au secteur électrique 220 V AC. Ce dispositif nécessite un signal de commande de 3 V DC à 12 V DC, transmis, à travers un isolateur optoélectronique à un relais de puissance, vous mettant à l'abri, ainsi que votre circuit. Vous pouvez utiliser la tension d'alimentation de 6 V DC pour

commander ce relais. Bien entendu, cette protection rendra votre dispositif plus coûteux.

Principe du circuit

Vous trouverez sur la fig. 7-1 un schéma utilisant des composants qui vous sont maintenant familiers. La partie haute est très similaire au comparateur utilisé dans l'expérience 6 (sur la fig. 6-3) avec quelques liaisons modifiées. La différence principale est la disparition de la diode LED reliée à la sortie du LM339, la résistance de rappel à gauche de sa sortie est passée de $470\ \Omega$ à 10K et le potentiomètre de 500K , permettant l'ajustement de la contre-réaction positive, a été remplacé par une résistance fixe de 220K , assurant une hystérésis correcte dans ce cas.

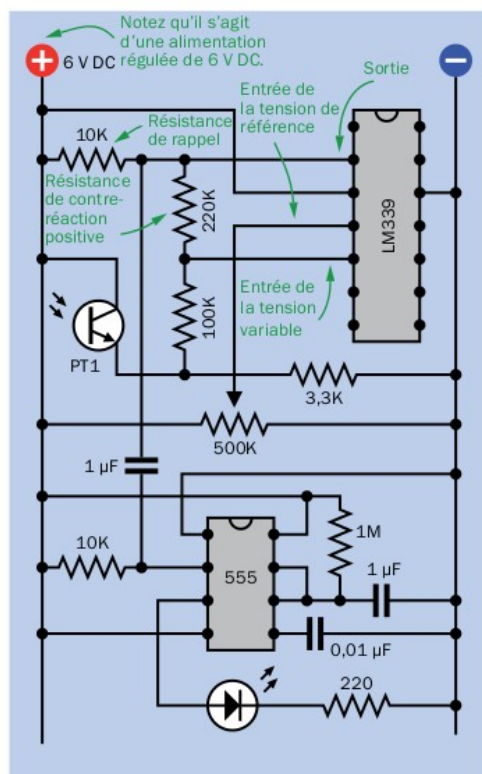


Figure 7-1. Le phototransistor et le comparateur de l'expérience 6 pilotent maintenant un temporisateur 555 générant une impulsion d'une seconde. Le circuit est maintenant alimenté en 6VDC.

Après avoir effectué ces modifications, vous êtes prêt à ajouter les autres composants du circuit. Un exemple de ce montage est illustré sur la fig. 7-2.

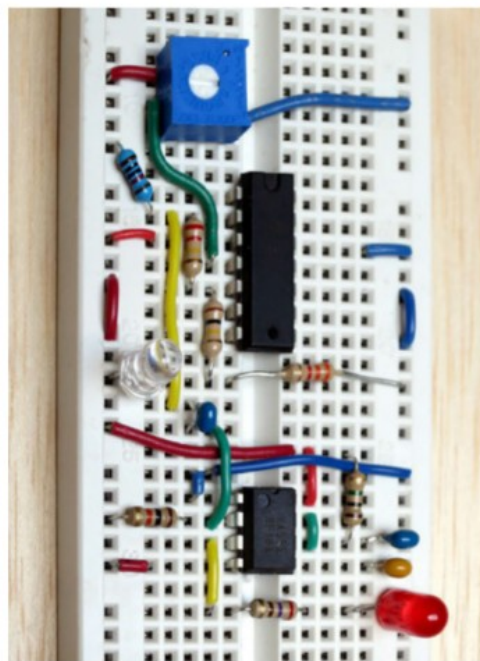


Figure 7-2. Première partie de l'interrupteur de lampe chronophotonique.

Il s'agit maintenant d'un circuit alimenté sous 6 V DC. Comme je vais ajouter un relais bistable commandé par un transistor qui a une masse commune à ses deux bobines, le transistor commandant le relais doit être utilisé en mode collecteur commun, ce qui entraîne une baisse significative de tension. L'alimentation de 6 V DC compensera cette baisse.

Vous devez retirer le régulateur LM7805 de votre alimentation et le remplacer par un LM7806. Il s'agit d'une simple substitution, leurs brochages étant identiques. Je n'ai pas pris la peine d'inclure l'alimentation dans le schéma simplement parce qu'elle est très simple.

La broche de sortie 2 du LM339 pilote maintenant la gâchette à gauche du 555 au travers d'un condensateur

de 1 μF . Le timer a sa propre résistance de rappel de 10K lui permettant de maintenir sa gâchette à l'état haut afin que sa sortie soit normalement basse. Pour rappel :

- Quand un temporisateur 555 fonctionne en mode monostable, sa sortie demeure basse tant que la tension de sa gâchette est haute.
- Quand on abaisse la tension de gâchette au niveau bas, sa sortie devient haute pour une durée déterminée par le condensateur et la résistance reliés au timer.

L'idée est de provoquer le changement de la sortie du LM339 par le phototransistor quand la lumière devient plus faible, ce qui déclenchera le fonctionnement du temporisateur qui générera une impulsion durant environ une seconde. Cette impulsion va à son tour déclencher un relais (pas encore représenté) qui allumera une lampe. Pour l'instant, j'ai placé une LED reliée à la sortie du temporisateur simplement pour que vous puissiez observer le fonctionnement.

Appliquez la tension d'alimentation et attendez que le temporisateur s'initialise. Orientez une lumière brillante vers le phototransistor, puis éloignez progressivement la source lumineuse (ou faites une ombre avec votre main) afin de simuler l'assombrissement du crépuscule. Vous devriez alors voir la LED s'allumer pendant 1 seconde. Essayez maintenant d'ajuster la sensibilité du phototransistor à l'aide du potentiomètre ajustable, puis répétez l'essai. Assurez-vous que votre circuit fonctionne de façon fiable avant de continuer.

Étape suivante

La fig. 7-3 montre l'étape suivante de ce projet. La sortie du temporisateur est maintenant reliée à la base d'un transistor à travers une résistance de 1K ; ce transistor commandera une des bobines d'un relais 3 V DC. La seconde bobine est activée par un bouton-poussoir. La résistance de 47 Ω est nécessaire pour protéger le relais de la tension d'alimentation de 6 V. Ce bouton-poussoir sera supprimé dans la version finale du circuit, il sera utile pour démontrer le fonctionnement du dispositif. De même, des LED ont été ajoutées aux sorties du relais pour visualiser leur état.

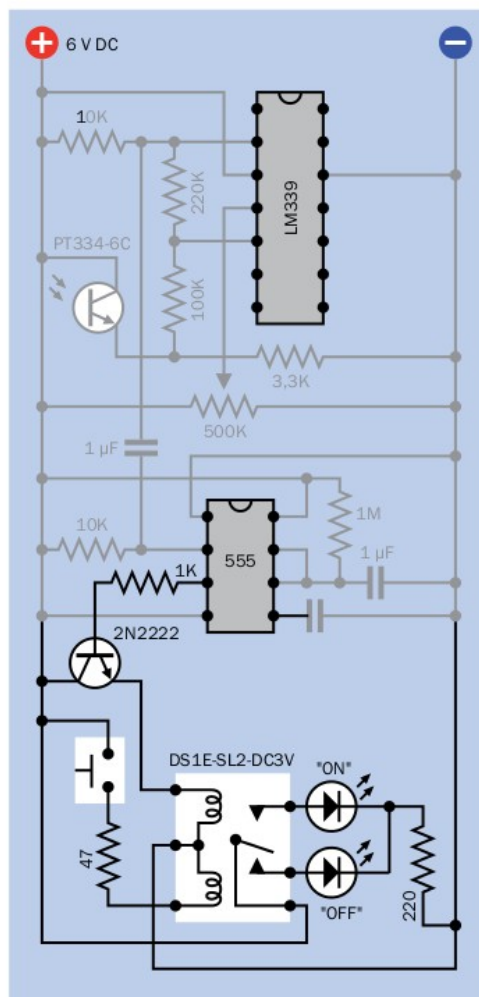


Figure 7-3. Le schéma précédent a été complété par l'ajout d'un relais. Le câblage précédent est en gris.

Vous devez vous rappeler, dans *L'Électronique en pratique*, nous avons vu qu'un relais bistable demeure dans un ou l'autre de ses deux états possibles sans consommer d'énergie. Il a juste besoin d'une brève impulsion pour basculer d'un état à l'autre. C'est donc un dispositif idéal pour un circuit qui doit assurer le

fonctionnement d'un appareil (ici une lampe) pour une longue période tout en minimisant sa consommation.

Vous vous souciez peut-être de savoir pourquoi nous avons besoin d'un transistor entre la sortie du timer et le relais. Un 555 bipolaire n'est-il pas suffisant pour piloter directement un petit relais ? En théorie, si ; cependant, lorsque une tension d'alimentation relativement faible est utilisée, le relais peut rendre le comportement du temporisateur erratique. Cela n'est pas dit dans les fiches techniques mais je l'ai constaté.

Test du circuit

Suivez ces étapes pour vérifier votre circuit.

- Appuyez sur le bouton, la LED en bas du relais devrait s'allumer. Cette connexion au relais provoquera l'extinction de la lampe lorsque nous la relierons.
- Relâchez le bouton et diminuez progressivement la lumière atteignant le phototransistor, simulant la présence du soleil.
- Cela pourrait basculer le relais dans son autre position, provoquant l'allumage de la LED supérieure. Vous pourrez remplacer cette LED par une lampe qui s'allume au coucher du soleil.
- Appuyez à nouveau sur le bouton-poussoir. Il sera possible de le remplacer par une horloge qui éteindra la lampe à une heure prédéterminée.
- Augmentez progressivement la lumière atteignant le phototransistor, simulant ainsi le lever du jour, rien ne devrait se produire.
- Diminuez à nouveau la luminosité, le cycle devrait se répéter à nouveau.

Détails concernant le relais

Le relais que j'ai choisi est un relais Panasonic DS1E-SL2-DC3V possédant des bobines prévues pour une tension de 3 V DC car la tension délivrée par le transistor est d'environ 4 V, ce qui est trop peu pour commander un relais prévu pour 5 V DC. Selon la fiche technique du relais, celui-ci peut tolérer une tension d'excitation de ses bobines atteignant 4,8 V DC, il convient donc à ce circuit.

Sur la fig. 7-3, le relais est représenté avec ses broches de connexion positionnées telles que vous les utiliserez

(vue du dessus). Vérifiez sur la fig. 7-4 si vous n'êtes pas certain du rôle de chaque broche. Les numéros que vous voyez à côté des broches sont gravés sur la face inférieure du relais. Panasonic n'a pas souhaité les numéroter simplement de 1 à 6 pour respecter une disposition des broches de ses différents relais toujours identique, certains d'entre eux possédant 12 broches de connexion.

Si vous utilisez un relais différent, vérifiez la disposition et la fonction de ses broches sur sa fiche technique car elles ne sont pas standards d'un fabricant à l'autre. Vous devez utiliser un relais bistable 3V DC prévu pour couper une intensité de 2 A.

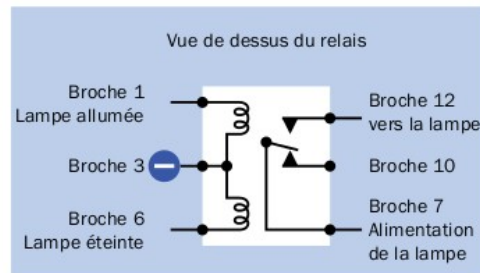


Figure 7-4. Brochage du relais Panasonic DS1E-SL2-DC3V, vu de dessus. Si un relais différent est utilisé, son schéma de branchement sera sûrement différent.

Notez que la bobine à l'intérieur d'un relais n'est pas forcément bidirectionnelle. En ce qui concerne le relais Panasonic, vous devez relier le pôle négatif de la masse sur la position indiquée. Si vous y reliez le pôle positif, il ne fonctionnera pas.

Condensateur de liaison

Le condensateur de 1 μ F situé entre le comparateur et la gâchette du 555 est un élément clé de ce circuit. Rappelez-vous qu'un condensateur dans cette configuration bloque le courant continu mais, lorsque la tension qui lui est appliquée change, le condensateur transmet l'impulsion résultante.

Voici comment cela fonctionne.

- Une lumière brillante atteignant le phototransistor génère un niveau haut à l'entrée du comparateur.
- Le niveau haut appliqué à l'entrée du comparateur, s'il est suffisant, va générer un niveau haut sur sa

sortie, maintenant alors une charge positive de ce côté du condensateur.

- Le temporisateur 555 a une entrée haute en raison de la résistance de rappel de 10K.
- Le relais est en position « arrêt ».
- Rien ne se passe.

Maintenant, alors que la luminosité appliquée au phototransistor diminue :

- La tension issue du phototransistor passe sous la tension de référence du comparateur.
- Le comparateur bascule à l'état bas.
- Le condensateur de liaison transmet cette fluctuation au temporisateur, contrariant momentanément l'action de la résistance de rappel.
- Le timer réagit en générant sur sa sortie une impulsion haute qui va commander le relais. Le relais bascule vers sa position « marche » (ce qui peut allumer une lampe).
- Après quoi le condensateur poursuit son rôle, bloquant la tension continue.

Assurez-vous que le circuit fonctionne. Jusqu'à présent, il n'a été déclenché que par la présence de photons (que vous pouvez considérer comme des particules de lumière) et par le bouton-poussoir. La prochaine étape va consister à ajouter la partie « chrono » de « chronophotonique ».

Découvrez l'intérieur d'un réveil

Si vous souhaitiez construire vous-même votre programmateur horaire, vous auriez acheté un circuit intégré temporisateur, un afficheur numérique et quelques boutons-poussoir pour régler le timer, mais cela me paraît compliqué et coûteux. Vous pourriez aussi utiliser un microcontrôleur avec un oscillateur externe à quartz, mais vous auriez toujours besoin d'un afficheur et la mise en œuvre reste toujours plus complexe que je ne le voudrais.

Pour quelques euros, je peux acheter un réveil avec son afficheur et les boutons de réglages incorporés au supermarché.

Peut-il être utilisé d'une façon ou une autre avec notre circuit de contrôle de lampe chronophotonique ? Je pense que oui. Assurez-vous simplement de choisir un

réveil qui fonctionne avec deux piles de 1,5 V. Faites attention : certains réveils utilisent une seule pile de 1,5 V, ils ne fonctionneront pas avec ce circuit. Les réveils de voyage sont souvent alimentés par une seule pile de 1,5 V. Vérifiez attentivement son emballage !

Attention : pas de réveil branché sur le secteur !

Merci de ne pas tenter d'adapter un réveil qui se branche sur le secteur électrique. À l'intérieur, la tension du secteur est probablement transformée en une tension non dangereuse mais il existe un risque non négligeable de réaliser par erreur une liaison avec le potentiel élevé du réseau électrique.

Observez l'intérieur

Vous disposez donc d'un réveil alimenté par une tension de 3 V. Qu'elle que soit leur marque, tous les réveils digitaux doivent activer un buzzer interne et l'on peut se relier à cette fonctionnalité pour les besoins de notre circuit.

La première étape consiste à ouvrir le boîtier en plastique. Le réveil noir figurant sur la fig. 7-5 page suivante possède quatre vis sous son socle (cerclées), trois d'entre elles ancrées profondément. Le modèle blanc sur la fig. 7-6 page suivante a seulement une vis, cachée à l'intérieur du compartiment à piles. La photo montre son dévissage à l'aide d'un petit tournevis Phillips dont vous aurez probablement besoin. Ils sont vendus pour quelques euros en coffret de dimensions assorties dans tout magasin de bricolage.



Figure 7-5. Les quatre vis (cerclees) doivent être retirées pour ouvrir ce réveil.



Figure 7-6. Une seule vis maintient le boîtier de ce réveil, elle est dissimulée dans le compartiment à piles.

Alimentation du réveil

Dès que le boîtier de votre réveil est ouvert, vérifiez son alimentation. Insérez les piles dans leur emplacement et observez la face interne du compartiment à piles. Trois réveils sont illustrés sur les fig. 7-7, 7-8 et 7-9. Sur chaque photo, les points de connexion marqués A et B fournissent respectivement +3 V et 0 V. Utilisez votre multimètre pour vérifier les connexions de votre réveil.

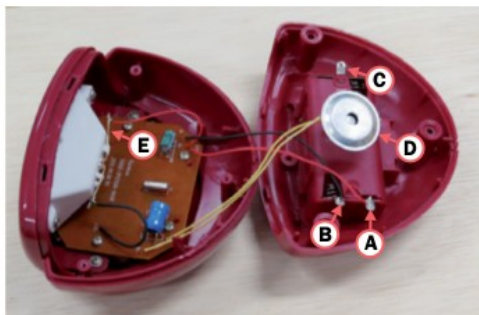


Figure 7-7. La tension de 3 V fournie par les piles est disponible aux points A et B. Le point de liaison C n'est pas connecté, D est relié au buzzer, et E à une LED qui éclaire l'afficheur lorsque l'alarme est stoppée.

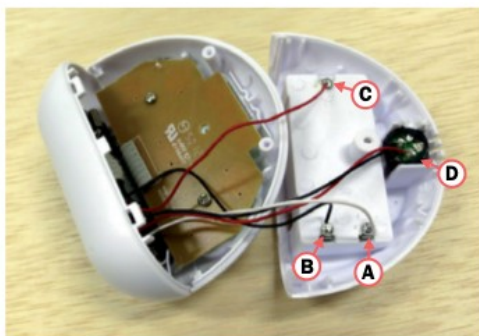


Figure 7-8. La tension de 3 V fournie par les piles est disponible aux points A et B. Le point C délivre 1,5 V au circuit intégré, D est relié au buzzer.

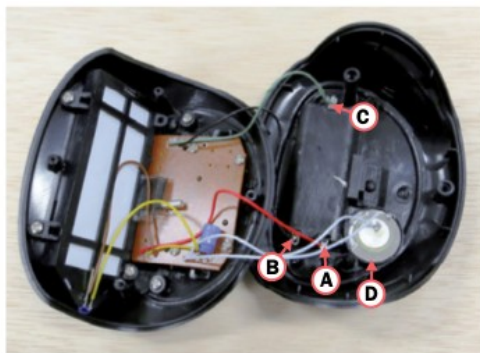


Figure 7-9. La tension de 3V fournie par les piles est disponible aux points A et B. Le point C délivre 1,5V au circuit intégré, D est relié au buzzer.

Sur ces trois photos, le point de connexion C peut fournir la tension intermédiaire de 1,5 V correspondant à la liaison milieu des piles. Certains réveils n'utilisent pas cette possibilité, d'autres s'en servent pour alimenter leur circuit intégré prévu pour fonctionner sous une faible tension. Cela n'a pas d'intérêt pour nous car nous avons besoin des 3 V que le réveil requiert pour activer son alarme.

Le buzzer est identifié par la connexion D pour chacun des réveils. Le modèle rouge sur la fig. 7-7 possède aussi une connexion E pour allumer une LED.

Vous devez maintenant déterminer ce que le réveil fait lorsque son buzzer retentit. Les piles étant en place, reliez le fil noir de votre multimètre au point B, le pôle négatif de l'alimentation. Ce sera plus facile avec un cordon muni d'une pince crocodile à chaque extrémité. Une pince sera connectée au point B, l'autre à la pointe du cordon noir. Vous disposez ainsi de vos deux mains pour le reste des manipulations. La façon de mesurer le comportement du buzzer est illustrée sur la fig. 7-10.

Reliez la pointe de touche rouge au point A afin de vérifier que vous mesurez au moins 3 V DC. Reliez maintenant votre pointe de touche rouge à l'un des points de soudure du buzzer, vous devriez trouver à peu près la même valeur que celle mesurée sur les piles. Essayez sur l'autre point de soudure, la mesure devrait être identique. Puisqu'il y a la même tension sur les deux extrémités du buzzer, aucun potentiel ne le traverse. Ceci explique pourquoi il ne retentit pas.



Figure 7-10. Mesure de la tension sur le buzzer à l'intérieur d'un réveil à l'aide d'un cordon muni de deux pinces crocodile évitant l'usage des mains. Le buzzer est le petit composant circulaire auquel une pince crocodile rouge est reliée à l'un de ses points de soudure.

Réglez le réveil pour qu'il se déclenche une minute après l'heure actuelle et assurez-vous que la position réveil est enclenchée. Le fil noir de votre multimètre doit toujours être relié au pôle négatif des piles. Dès que le réveil retentit, reliez à nouveau le cordon de mesure rouge à chaque point de soudure du buzzer. Cette fois, je fais le pari que l'un des points apparaîtra instable, indiquant une tension plus faible que l'autre qui devrait indiquer une tension de 3 V stable. Je vais me référer à la connexion du buzzer instable comme étant le « point froid ».

Modifiez le multimètre pour la mesure des tensions alternatives et mesurez à nouveau le « point froid » tandis que le réveil continue de retentir. Je pense que vous devriez mesurer une tension alternative inférieure à 3 V mais supérieure à 1 V. Cette tension devrait fluctuer de façon moins importante que lors de la mesure de la tension continue.

Comment retentit-il ?

Que se passe-t-il ? Quelque chose doit activer le buzzer alternativement silencieux et retentissant. Il devrait s'agir d'un transistor à l'intérieur du réveil. Dans tous ceux que j'ai étudiés, le transistor était relié au « point froid » du buzzer (exactement comme la sortie à collec-

teur ouvert d'un comparateur) et absorbait le courant nécessaire à la production d'un son. Le principe est présenté sur la fig. 7-11.

Vous ne trouverez pas ce transistor, en fait il est inclus à l'intérieur du circuit intégré principal qui accomplit toutes les fonctions du réveil. Il s'agit probablement d'un type CMOS plutôt que le type bipolaire représenté sur la fig. 7-11, le principe restant le même. Je m'y référerai en tant que « transistor du buzzer ».

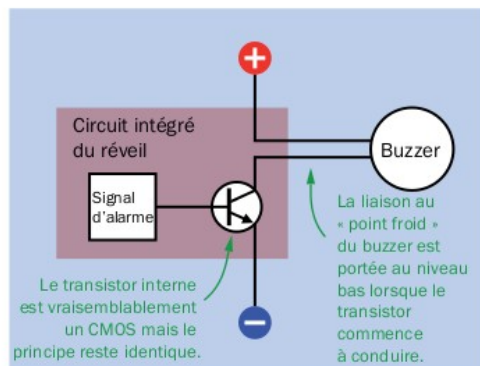


Figure 7-11. Configuration typique permettant la production d'un son par un buzzer dans un réveil. En réalité, un transistor CMOS peut être utilisé mais le principe reste identique.

Lorsque le son ne retentit pas, le transistor du buzzer bloque le courant. Le courant en provenance des piles ne peut pas s'écouler, c'est pourquoi vous mesurez une tension de 3 V sur chacun des points de connexion du buzzer.

Lorsque l'alarme se déclenche, le buzzer retentit, le transistor fait s'écouler le courant au travers du buzzer et de votre multimètre, vous permettant ainsi de mesurer une tension plus faible au point froid du buzzer. Cependant la tension n'a pas seulement diminué, elle était également fluctuante. Pourquoi cela ?

Vous pouvez vous procurer des buzzers qui créent leur propre tonalité audible lorsqu'ils sont simplement alimentés par une tension continue fixe. Cependant, ils sont plus coûteux que les buzzers dits passifs, fonctionnant comme un haut-parleur. Un réveil bon marché sera conçu avec un buzzer bon marché et le circuit intégré utilisé devra assurer la génération de la tonalité audible. Il s'agit d'une sorte de tension alternative, probablement entre 1 kHz et 2 kHz, c'est pourquoi vous avez obtenu

une mesure plus significative en configurant votre multimètre pour la mesure des tensions alternatives.

Je parie que cette tension varie entre une valeur haute proche de 3 V et une valeur basse avoisinant le 0 V. Vous n'avez pas pu observer cela à l'aide de votre multimètre car celui-ci ne réagit pas assez rapidement pour le démontrer.

Utilisez le son produit

Comment peut-on utiliser le signal variable du buzzer ? En fait, nous disposons de quatre comparateurs à l'intérieur du LM339, mais nous n'utilisons que l'un d'entre eux pour le phototransistor, que j'appellerai « comparateur A ». Nous pouvons maintenant en utiliser un autre nommé « comparateur B » pour fonctionner avec le réveil. En réponse au signal en provenance du réveil, le comparateur B déclenche un autre temporisateur 555 qui va activer la seconde bobine du relais afin d'arrêter le fonctionnement de la lampe.

Une question délicate subsiste : comment relier le réveil au comparateur B ? Le réveil est alimenté en 3 V DC alors que le circuit comparateur utilise du 6 V DC. Il est donc important de protéger le réveil de cette tension plus élevée. Pour cela, on fait appel à une caractéristique du comparateur mentionnée plus tôt : la tension que contrôle un comparateur peut être totalement différente de celle qui l'alimente.

Observez ci-contre le montage de la fig. 7-12 et sa réalisation sur la fig. 7-13. Les trois connexions ayant un encadré blanc en haut du schéma sont reliées au pôle positif d'alimentation du réveil, à son pôle négatif et au point froid du buzzer. Le signal issu du buzzer est relié au travers d'un condensateur de liaison à l'entrée non inverseuse du comparateur B, broche 11 du LM339. La tension sera de 3 V DC ou moins et activera le comparateur.

La broche 13 est la sortie du comparateur B. Un niveau de 6 V DC (obtenu grâce à la résistance de rappel de 10K) est utilisé pour déclencher un second timer 555 inséré juste au-dessus du relais et qui contrôle la seconde bobine du relais par l'intermédiaire d'un transistor bipolaire. En réalisant ce circuit, notez que sur le LM339, la broche non inverseuse que vous utilisiez précédemment n'est pas directement en face de la broche non inverseuse située à droite du circuit intégré.

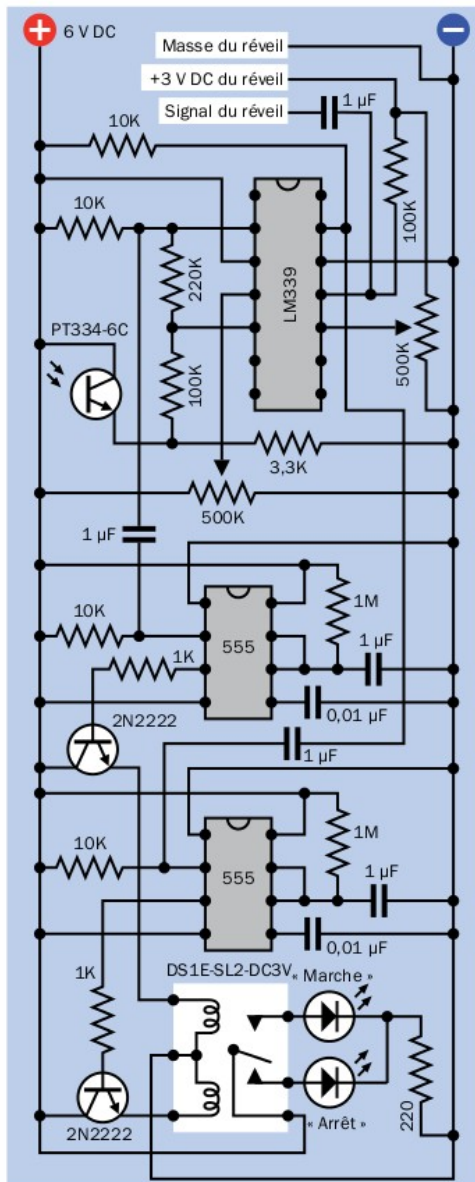


Figure 7-12. Le schéma complet de l'interrupteur de lampe chronophotonique.

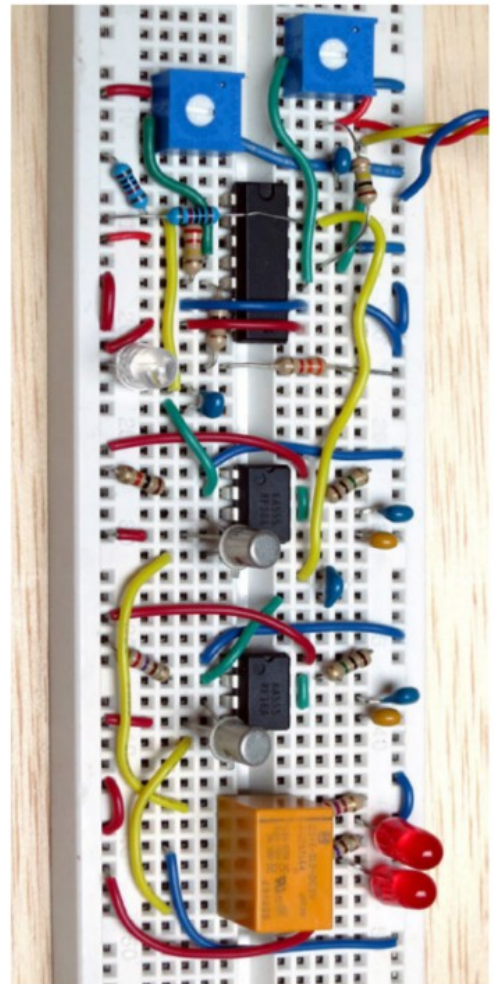


Figure 7-13. Montage final de l'interrupteur chronophotonique, exception faite du réveil et de l'alimentation nécessaires au fonctionnement. Les trois fils colorés sortant de l'image en haut à droite sont reliés au réveil.

Vérifiez le brochage du LM339 sur la fig. 7-12 afin d'être sûr de ne pas mélanger les entrées. Rappelez-vous que l'entrée « + » est l'entrée non inverseuse.

Pour que l'ensemble fonctionne, le réveil et le montage doivent partager leur connexion de masse. Toutes

les tensions doivent être relatives à cette masse. Le 3 V DC du réveil ne doit pas être utilisé sur la plaque de montage à l'exception des entrées du LM339. Comme déjà évoqué, la tension associée au courant traversant le comparateur peut être différente de celle alimentant le circuit intégré.

Lorsque vous connecterez un fil au buzzer du réveil, assurez-vous de le faire au niveau de la soudure du point froid, là où vous aviez détecté une tension fluctuante lorsque le buzzer produisait un son.

En ajoutant une connexion à ce point de soudure, vous pourriez endommager le buzzer par excès de chaleur ou, problème tout aussi ennuyeux, déconnecter le fil existant en essayant de souder le vôtre. Pour éviter cela, j'ai utilisé ma pince pour dénuder un segment de l'isolant du fil existant auquel j'ai relié le nouveau fil à cet endroit, comme représenté sur la fig. 7-14.

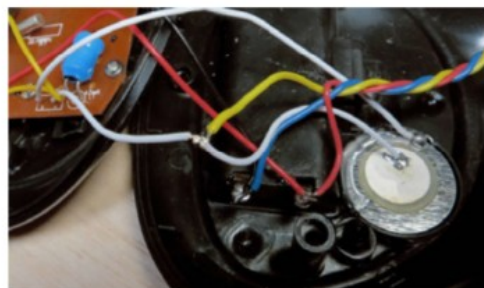


Figure 7-14. Le fil jaune est relié au fil blanc d'origine aboutissant au point froid du buzzer à l'intérieur du réveil. Les fils bleu et rouge ont été reliés au support de piles.

Vous pourriez éventuellement déconnecter le buzzer car le son qu'il émet est sans intérêt pour le fonctionnement de l'interrupteur de la lampe. Pour l'instant, alors que vous mettez au point votre montage, son sifflement est important car il vous informera du fonctionnement du réveil.

Connectez le réveil

Voici les étapes précises à suivre pour relier votre circuit. Retirez les piles du réveil pendant que vous suivez ces instructions jusqu'à l'étape 6.

1. Reliez le pôle négatif du compartiment à piles du réveil à la ligne d'alimentation négative du montage (masse).

2. Reliez le pôle positif du compartiment à piles à l'une des extrémités d'un potentiomètre ajustable de 500K qui va régler la tension de référence du comparateur B. Reliez l'autre extrémité du potentiomètre à la masse du montage. Connectez son curseur à la broche 10 du LM339, son entrée inverseuse recevant la tension de référence. Réglez le potentiomètre en son point milieu. Ces connexions sont représentées du côté droit du schéma.
3. Connectez un fil depuis le point froid du buzzer à un condensateur de 1 μ F sur la plaque de montage. (Ceci est un autre exemple de condensateur de liaison). Reliez l'autre extrémité de ce condensateur à la broche 11 du LM339 qui est son entrée non inverseuse. Le condensateur transmettra les impulsions du réveil au comparateur tout en bloquant la tension continue.
4. Ajoutez deux résistances de rappel aux broches 10 et 13. Remarquez que l'une a une valeur de 100K et se trouve reliée au 3V provenant du réveil et non au 6V du montage. Ce point est très important.
5. Alimentez maintenant votre montage et vérifiez soigneusement vos tensions, particulièrement sur les fils qui vont au réveil. Évitez d'endommager votre réveil avec le 6 V DC du montage !
6. Insérez les piles du réveil et vérifiez qu'il y a bien 3 V DC sur la connexion reliée à l'alimentation 3 V du réveil. Vérifiez également que le pôle négatif des piles du réveil est bien relié à la masse du montage.
7. Réglez l'heure de réveil une minute au-delà de l'heure actuelle et attendez qu'il sonne. Votre multi-mètre, ayant son fil rouge à la broche 13 du comparateur B, devrait indiquer une sortie fluctuante.

Tout cela semble compliqué mais lorsque le tout fonctionnera, ce sera stable. La prochaine étape consiste à ajouter le second temporisateur 555. Le tout est câblé du côté droit du LM339 exactement de la même manière que le premier a été câblé du côté gauche.

Comment cela devrait fonctionner

Alors que le réveil ne sonne pas, la tension positive des piles du réveil traverse la résistance de rappel de 100K et maintient l'entrée non inverseuse du comparateur B à environ 3 V DC. L'impédance d'entrée du LM339

est si élevée que seuls quelques microampères sont absorbés. Lorsque le réveil se déclenche, le transistor du buzzer interne du réveil commencera à osciller à une fréquence audible, envoyant des trains d'impulsions à l'entrée non inverseuse du comparateur. Le comparateur verra que, pendant le court intervalle entre deux impulsions, la tension chute sous sa tension de référence de 1,5 V que vous avez réglée avec le potentiomètre ajustable à droite du circuit. En conséquence, le comparateur va déclencher le temporisateur 555 qui va actionner le relais qui éteindra alors la lampe.

Pour un comparateur, un signal audio est très lent. Sitôt que la tension chute sous 1,5 V pour une fraction de seconde, le comparateur génère un niveau bas à sa sortie qui va déclencher le timer 555. Tout comme le comparateur, le temporisateur n'a aucun problème pour réagir à un signal d'entrée rapide. Il produit une impulsion d'une seconde pour commander le relais.

Tandis que le réveil continue de produire un son, le comparateur continue de déclencher le timer qui maintiendra son impulsion haute au relais mais cela n'a pas d'importance. Le relais a déjà été commuté en position « arrêt » et un maintien de l'impulsion haute lui demandera de continuer ce qu'il a déjà fait. Après environ une minute, le réveil cessera de générer son sifflement et s'arrêtera. Le circuit restera ainsi pour le reste de la nuit.

Que se passe-t-il ensuite ? La lumière du jour active le phototransistor et le comparateur A réagit en mettant sa sortie au niveau haut. Une impulsion positive est transmise au premier temporisateur 555 qui l'ignore puisqu'il a son entrée déjà maintenue au niveau haut par la résistance de rappel.

Pendant la journée, rien ne se passe. Le crépuscule arrivant, le phototransistor enverra un signal bas au comparateur A. La sortie à collecteur ouvert du comparateur absorbe alors le courant, ce qui sera interprété comme une impulsion négative par le premier temporisateur 555, forçant au niveau bas le niveau haut imposé par la résistance de rappel de 10K. Le temporisateur se déclenche et envoie une impulsion au relais qui allumera la lampe. Le cycle se répète alors.

À ce point précis, vous vous demandez peut-être si le tout va réellement fonctionner ? Eh bien, ma version a réussi (avec trois réveils différents) et je pense que la vôtre devrait également fonctionner. Le type de réveil que vous utiliserez importe peu pour autant qu'il soit

de type digital (pas un ancien modèle à aiguilles) et alimenté par piles. Tout réveil digital contient un buzzer. La tension aux bornes de celui-ci passera du niveau haut au niveau bas lors du déclenchement du réveil et si vous vous reliez à ce signal, le réveil ne le remarquera pas (tant que vous y reliez un composant à haute impédance d'entrée comme un comparateur qui absorbera peu de courant).

Peut-être existe-t-il des réveils dont le buzzer reçoit des tensions variant du niveau bas vers le niveau haut lors de leur fonctionnement, peut-être s'agit-il d'une tension continue au lieu d'une oscillation rapide comme je l'ai évoqué. Mais tous les réveils produisent un son intermittent, il y aura donc des impulsions hautes et basses et la première impulsion basse provoquera bien le déclenchement du comparateur B.

Tests

Pour tester le circuit, appliquez la tension d'alimentation, cachez le phototransistor par une ombre, puis illuminez-le fortement et assombrissez-le à nouveau. Cela devrait basculer le relais en position « allumage » de la lampe. Réglez alors l'heure de réveil une minute plus tard, et quand le réveil sonne, le relais devrait basculer dans la position « arrêt » de la lampe. Si cela ne fonctionne pas ainsi, vérifiez les tensions à divers points du montage à l'aide de votre multimètre. La clé du succès est de procéder sans précipitation, dans le calme et avec persévérance.

Une fois votre circuit au point, vous pourrez retirer les diodes LED dont vous n'avez plus besoin.

Pour un fonctionnement fiable et afin de minimiser la consommation du circuit, il est préférable d'éviter que les entrées inutilisées du LM339 puissent fluctuer en raison de leur état non défini lorsqu'elles sont laissées libres. Sur la fig. 7-15 page suivante, vous verrez comment elles peuvent être connectées. Une entrée doit avoir un niveau haut alors que l'autre doit être maintenue au niveau zéro, peu importe laquelle.

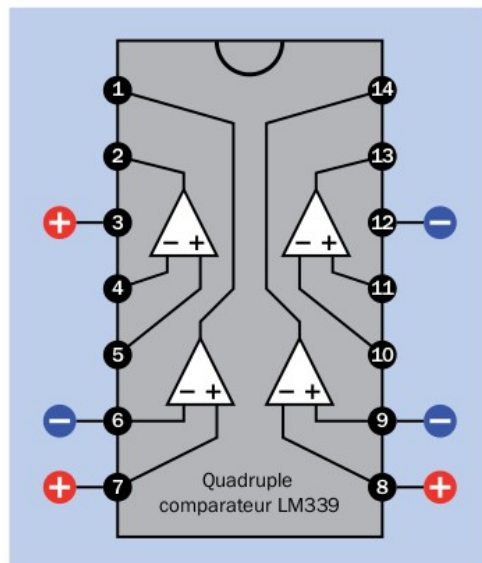


Figure 7-15. Comment désactiver les deux comparateurs du LM339 non utilisés.

Connexion du relais à la lampe

Débranchez le fil qui amène le 6 V DC à la broche en bas et à droite du relais. Connectez cette broche à l'un des pôles de l'alimentation de votre lampe et routez un autre fil de la lampe à la broche située en haut et à droite du relais. L'autre connexion de la lampe devra être reliée à l'autre pôle de son alimentation. Prenez la précaution de garder l'alimentation de la lampe isolée des composants et des connexions de la plaque de montage. La fig. 7-16 montre le schéma du circuit.

Comme indiqué précédemment, je suggère fortement que vous utilisiez une lampe de 12 V. Vous pouvez aisément vous procurer bon nombre de diodes LED 12 V à moindre coût, car elles sont fabriquées en grande quantité pour les appareils informatiques. Recherchez par exemple « alimentation 12 V » sur eBay.

Lorsque vous aurez obtenu le comportement attendu de votre interrupteur chronophotonique, vous devrez décider de l'endroit où le placer ; l'idéal serait face à une fenêtre exposée au nord. Le phototransistor devra être protégé de l'exposition directe à la lumière solaire, il ne devra pas non plus voir la lampe qu'il commande.

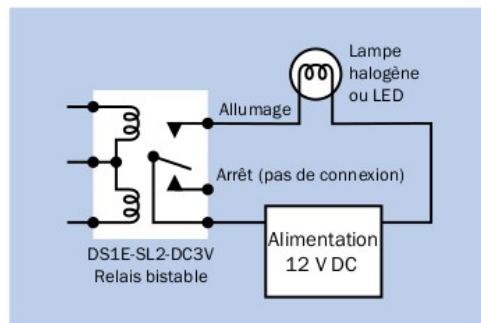


Figure 7-16. Après que le circuit a été complètement testé, les voyants LED peuvent être déconnectés du relais et une lampe peut être reliée selon le schéma ci-dessus.

Patientez jusqu'au coucher du soleil et ajustez le potentiomètre de gauche qui règle la tension de référence pour le phototransistor. Tournez la vis de réglage jusqu'à ce que la lampe s'allume et revenez légèrement en arrière.

Attention : prudence avec le secteur électrique

Si vous persistez à alimenter votre lampe par le secteur électrique, merci de prendre les précautions suivantes.

- Réalisez une version définitive soudée du circuit. Ne reliez jamais la tension du secteur à une plaque de montage, car il est trop facile qu'un fil soit inséré à une mauvaise position. Vous ne souhaitez probablement pas griller vos composants par erreur. Les fils peuvent aussi se déconnecter avec facilité.
- Tout point de soudure qui sera relié au 220 V AC devra être enrobé par un isolant liquide ou tout composé qui est isolant après durcissement.
- La phase de l'alimentation électrique doit être protégée par un fusible de 1 A avant d'aboutir au relais.
- Le circuit devra être protégé par un coffret. Si celui-ci est en métal, il devra être relié à la terre de la prise électrique.
- N'essayez pas d'allumer une lampe à incandescence de plus de 60 W, évitez les lampes fluorescentes. Elles contiennent un circuit d'allumage dit « ballast » qui consomme une intensité importante lors de l'allumage. Cela serait dommageable pour les contacts du relais.

Pour aller plus loin

Ce circuit présente une consommation électrique raisonnablement faible. Ma version nécessite environ 11 mA en veille, après avoir retiré les diodes LED. Le relais utilise environ 65 mA lors de son basculement mais cela ne se produit que deux fois par jour. Le circuit peut donc être alimenté par une pile de 9 V mais de façon temporaire car celle-ci ne durera guère plus de 24 heures.

Vous avez donc besoin d'un adaptateur secteur pour l'alimentation permanente. Si vous habitez dans une zone où les coupures sont fréquentes, vous pouvez conserver la pile de 9 V en alimentation de secours.

Sur la fig. 7-17, vous pouvez comprendre comment procéder. Tant qu'au moins 10 V parviennent au régulateur 6 V, la pile de 9 V ne débite pas et pourrait ainsi durer au moins deux ans. (Utilisez une pile alcaline et non une batterie rechargeable, ces dernières ne gardant pas longtemps leur pleine charge.) La pile ne supporterait pas que l'alimentation secteur lui impose d'être parcourue par un courant, c'est pourquoi une diode est placée afin d'éviter cela. Si une coupure secteur intervient, la pile prend donc le relais et une seconde diode empêche celle-ci de se décharger au travers de l'alimentation secteur.

Si vous achetez une alimentation secteur de 12 V DC, vous pouvez également vous en servir pour alimenter une LED 12 V ou une lampe halogène. Vous devriez ajouter un condensateur de 100 μF (minimum) aux bornes de sortie de l'alimentation, au cas où celle-ci nécessite d'être filtrée.

Vous pouvez supprimer les piles du réveil en ajoutant un régulateur de tension de 3,3 V à votre montage tel qu'illustré sur la fig. 7-17. Sa sortie de 3,3 V sera acceptable pour le réveil car un couple de piles neuves délivre au moins cette tension. Le régulateur sera connecté au montage au niveau des connexions repérées « Masse réveil », « +3 V DC du réveil » sur le schéma. Les fils qui partent vers le réveil resteront en place, ils serviront maintenant à l'alimentation du réveil au lieu d'amener la tension des piles.

L'entrée du régulateur 3,3 V peut provenir de votre alimentation 6 V DC déjà utilisée. La masse doit être la même mais vous devez faire attention de garder sa sortie isolée de la ligne d'alimentation 6 V de la plaque de montage. Vous devrez également prévoir les condensateurs habituels de 0,1 μF et 0,33 μF garantissant la précision des niveaux de sortie des régulateurs (voir les détails sur la fig. 7-17).

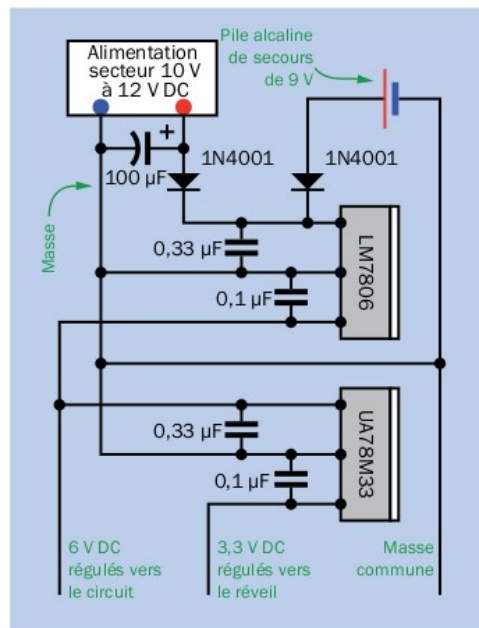


Figure 7-17. Amélioration de l'interrupteur de lampe comprenant l'alimentation secteur, la pile 9 V de secours et un régulateur 3,3 V pour l'alimentation du réveil, éliminant ainsi ses piles.

Et maintenant ?

Ce projet était assez conséquent. Il nous faut maintenant quelque chose de plus « léger » dans sa composition : ce qui peut être réalisé avec un microphone électret coûtant moins d'un euro, couplé à un amplificateur opérationnel qui fonctionne de façon similaire à celle d'un comparateur mais avec un objectif différent.



Aventures sonores

Entrons maintenant dans le monde fascinant des dispositifs analogiques. Dans un circuit analogique, les tensions peuvent être inférieures à 0 V ou positives, fluctuer de façon mystérieuse et imprévisible, et la tension que vous obtenez en sortie peut être 100 fois supérieure à la tension d'entrée, voire davantage.

Notre voyage commence avec un microphone et un amplificateur. En raison du comportement capricieux des composants analogiques, vous devez comprendre ce qui se passe précisément dans un circuit, ce qui nécessite un détour vers les méthodes de mesures (c'est dans ce but que j'ai inclus un exercice de mesures d'un transistor dans l'expérience 2).

Après avoir acquis les connaissances nécessaires dans les expériences 13 et 14, vous pourrez réaliser un gadget amusant qui combat le bruit en en créant davantage. Je dois vous avertir que comme dans toute quête d'inconnu, cela va nous conduire au moins vers une fausse piste avant que nous ne trouvions notre chemin vers la bonne conclusion.

Amplifiez

Au centre du monde de l'analogique se trouve un composant : l'amplificateur opérationnel. Il est souvent appelé AO ou AOP ou même abrégé « ampli-op » ou encore « op-amp », en raison de sa dénomination anglo-saxonne *operational amplifier*.

L'amplificateur opérationnel existait avant la création du comparateur. En fait, le comparateur est une évolution de l'amplificateur opérationnel, je l'ai utilisé en premier car sa sortie simplifiée « haute » ou « basse » facilite sa présentation.

Ces deux composants partagent le même symbole schématique car ils fonctionnent tous deux par comparaison de leurs deux entrées. Leur objectif est cependant différent. Les comparateurs servent principalement à éviter les tensions intermédiaires gênantes par l'utilisation de la contre-réaction positive. Les amplificateurs opérationnels, quant à eux, permettent de *prendre en compte* les infimes variations de niveau de leur entrée, et ont recours, pour cela, à la contre-réaction négative.

Présentation de l'électret

Un microphone démontre rapidement et simplement les possibilités d'un amplificateur opérationnel : je vais donc commencer par cela. Un microphone de type électret est disponible à très faible coût (parfois moins d'un euro) et, en raison de ses performances suffisantes, il entre dans la composition de dizaines d'appareils électroniques grand public, allant du téléphone mobile aux interphones ou casques pour joueurs.

Pourquoi appelle-t-on ce microphone un électret ? Il contient un film ELECTROstatiquement chargé se comportant comme un aimant (*magnET* en anglais) lorsqu'il est chargé en permanence. Les ondes sonores modifient la capacité entre le film et un autre élément qui lui est proche. Un petit amplificateur intégré au microphone perçoit ces changements et génère un signal de sortie. Le niveau de sortie est encore très faible, c'est pourquoi nous avons besoin d'un amplificateur opérationnel pour l'amplifier.

Certains électrets ont trois connexions mais le type à deux points de liaisons est le plus commun, c'est celui que j'utiliserai ici. L'une des connexions doit être reliée à la masse mais, à première vue, il n'existe aucune différence permettant d'identifier laquelle. Plus grave, les

fiches techniques des fabricants ne vous le préciseront pas non plus. Sans que l'on sache pourquoi (en tout cas en ce qui me concerne), la documentation relative aux électrets est très pauvre en informations, en comparaison de celles des autres types de composants.

Par chance, le point de connexion à la masse peut être identifié par une petite investigation digne d'un détective. Si vous observez un électret par le dessous, vous constatez que le fond isolant est vert, légèrement transparent, et vous pouvez distinguer une ou plusieurs languettes métalliques partant de l'une des connexions vers l'extérieur, jusqu'au boîtier cylindrique. Il s'agit de la connexion négative ou de masse.

Regardez le dessous des deux microphones électrets sur la fig. 8-1. L'un possède des fils de liaison tandis que l'autre ne présente que deux points de soudure, étant prévu pour des montages en surface. Dans chaque cas, vous pouvez apercevoir les petites languettes partant de la connexion à droite, il s'agit de leur connexion de masse.

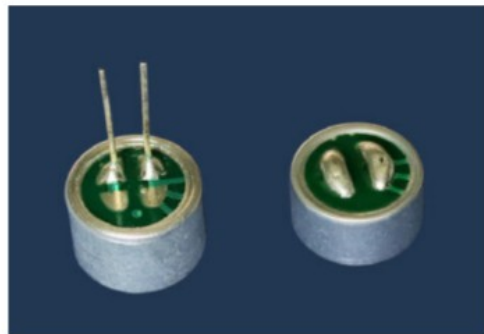


Figure 8-1. Dessous de deux microphones électrets courants, l'un possédant des fils, l'autre des points de soudure pour montage en surface. Le point de connexion à la masse est à droite pour chacun, identifié par les languettes métalliques visibles à travers le fond transparent.

Il existe quelques électrets qui ne ressemblent pas à ceux de ma photo. Ils peuvent présenter des connexions plus grosses ou un fond qui n'est pas vert. Vous devriez cependant apercevoir des liaisons grises ou or entre l'une des connexions et le boîtier du microphone, juste sous le fond isolant.

Si votre électret n'a pas de fils de liaison, vous devrez en souder vous-même, afin de pouvoir le relier à la plaque de montage. Pour cela, utilisez deux morceaux de fil

de câblage rigide de 0,2 mm² de couleurs appropriées pour reconnaître correctement chaque connexion. Découvrez le résultat sur la fig. 8-2.

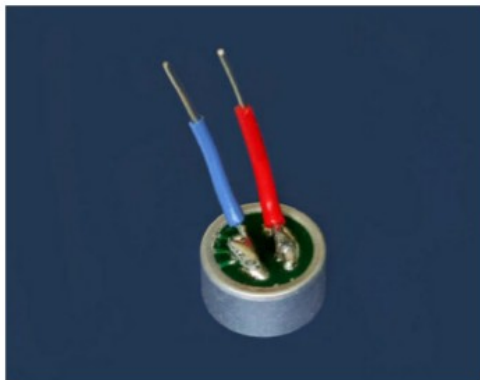


Figure 8-2. Un électret sans fils doit être équipé de deux fils courts, soudés, pour le relier à la platine de montage tels que ci-dessus. Les fils doivent avoir une couleur appropriée.

Comme tout petit composant, un microphone électret peut être endommagé par la chaleur. Si vous lui ajoutez vos propres fils, vérifiez s'il a résisté à cette épreuve. Voyons comment.

M'entendez-vous ?

Dans un schéma, un microphone est désigné par l'un des symboles de la fig. 8-3.

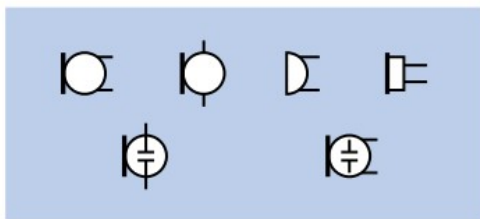


Figure 8-3. Il existe plusieurs manières de symboliser un microphone. En général, les ondes sonores semblent entrer par le côté gauche du symbole. Le symbole en haut tout à droite peut prêter à confusion car il ressemble à celui d'un écouteur qui serait orienté dans l'autre sens. Les deux symboles du bas représentent spécifiquement des microphones électret, mais la plupart des schémas comportant un électret utilisent un symbole générique.

Les symboles de la rangée supérieure peuvent être utilisés pour n'importe quel microphone alors que ceux du bas sont prévus spécifiquement pour les microphones électrets. La partie qui ressemble à un condensateur dans le cercle représente les plaques qui sont à l'intérieur d'un électret.

Je choisis le symbole en bas à gauche, car il est plus courant que celui en bas à droite. Le schéma de la fig. 8-4 présente le test d'un microphone le plus simple. Il ressemble étrangement au schéma utilisé pour un phototransistor sur la fig. 4-2. Cela est dû au fait que les deux comportent un transistor amplificateur intégré ayant une sortie à collecteur ouvert. En atteignant la fin de ce livre, vous constaterez que la plupart des capteurs existant comportent une sortie de ce type.

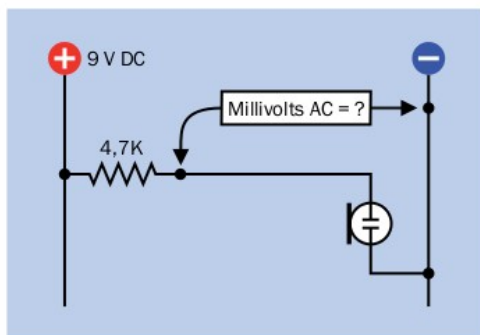


Figure 8-4. Le circuit le plus simple pour vérifier le fonctionnement d'un microphone électret.

Notez que j'ai prévu une tension d'alimentation de 9 V DC. Une pile de 9 V pourra convenir et vous n'aurez pas à ajouter de régulateur ni de condensateur de filtrage. J'ai indiqué une valeur de 4K7 pour la résistance mais vous pouvez descendre jusqu'à 1K. Sur ce point aussi, les fiches techniques des microphones restent peu loquaces et, lorsque vous aurez réalisé les circuits audio que je vais décrire, vous pourrez essayer diverses valeurs afin de déterminer celle qui convient le mieux à votre électret. J'entends par là la valeur qui correspond à un volume correct et à une qualité sonore optimale.

Insérez votre électret en respectant la polarité et réglez votre multimètre pour la mesure des tensions alternatives. Je dis bien AC, pas DC ! Toute mesure de tension continue n'aurait aucune signification.

Si le choix de la gamme de mesure de votre multimètre n'est pas automatique, réglez-le pour la mesure de millivolts et non de volts.

Les microphones étant relativement sensibles, il est déconseillé de les tester en tapant dessus ou en soufflant. Vérifiez-les avec des ondes sonores telles que celles auxquelles ils doivent répondre.

Reliez vos cordons de mesure, après stabilisation, une valeur très faible d'environ 0,1 mV devrait être indiquée. Faites maintenant « Aaah » devant le microphone, la tension mesurée devrait alors augmenter entre 10 mV et 20 mV. Votre électret est à votre écoute et vous répond.

Fondamentaux : l'essentiel sur les microphones

Le premier microphone produit en masse a été développé pour être utilisé dans les appareils téléphoniques. Breveté par Thomas Edison en 1877, il était constitué de granulés de charbon compressés entre deux plaques. Alors que l'une des plaques vibrait au gré des ondes sonores, chaque tremblement compressait momentanément les grains de carbone. Cela réduisait leur résistance apparente et modulait l'intensité continue qui les traversait.

Les microphones à charbon étaient des appareils primitifs, économiques et particulièrement résistants mais leur réponse en fréquence était réduite. Ils ont cependant été utilisés dans les combinés téléphoniques jusque dans les années 1950 (parfois plus tard dans certains pays).

Les microphones à condensateur mettaient à profit la variation de la capacité entre deux plaques chargées électriquement, selon les ondes sonores reçues. Ils fonctionnaient de façon identique à celle des électrets mais nécessitaient une tension de polarisation constante.

Les microphones à ruban tels que ceux de la première série réputée Shure, utilisée par les artistes du rock des années 1950 (dont Elvis Presley et James Brown), contenaient un ruban métallique qui vibrait en réponse aux ondes sonores. Leur concept a été détourné vers les microphones utilisant une bobine mobile qui fonctionnent comme un haut-parleur ou un écouteur, mais de façon inversée. Une membrane provoque la vibration

de la bobine mobile à l'intérieur d'un champ magnétique, induisant ainsi un courant dans cette bobine.

Le challenge technologique majeur des microphones a toujours été de concevoir mécaniquement des appareils capables de répondre de façon constante à une large gamme de fréquences sonores.

Lorsque le microphone électret a été développé par les laboratoires Bell dans les années 1960, ses performances étaient limitées par les matériaux alors disponibles. Des développements, menés dans les années 1990, ont considérablement amélioré ce composant à un point tel qu'il est dorénavant aussi performant qu'un ancien microphone dynamique (à bobine) haut de gamme, mais pour un coût nettement moindre.

Les hauts et les bas sonores

Sur la fig. 8-4, le microphone électret délivre un signal en absorbant un courant au travers d'une résistance externe. Comme je l'ai dit, il s'agit d'un système à collecteur ouvert, très similaire à celui utilisé avec un phototransistor mais, à part la valeur plus élevée de la résistance de rappel et la tension de fonctionnement, il existe une différence plus fondamentale. Vous mesurez en effet une tension alternative en provenance du microphone et non plus une tension continue.

Un son est une succession d'ondes de pression alternatives s'étendant entre une fréquence d'environ 20 Hz à 15 kHz (bien que certaines personnes disent entendre des sons jusqu'à 20 kHz). En comparaison, un phototransistor réagit à des ondes lumineuses ayant une fréquence si élevée qu'elles ne peuvent être considérées comme une source d'énergie stable. C'est pour cela qu'un phototransistor semble générer une tension continue.

La fréquence du son est beaucoup plus basse et comme il provoque des influx nerveux en faisant vibrer une membrane de l'oreille (le tympan), il est important de préserver ses fluctuations afin de maintenir son audibilité.

Sur la fig. 8-5, on voit en haut une personne émettant un son strident qui se déplace en une onde de forte pression, représentée en blanc. Du fait que les cordes vocales vibrent pour produire le son, l'onde de forte pression relative est suivie par une onde de plus faible pression relative, représentée en noir.

Je parle de pression « relative » mais vous pourriez vous demander « relative à quoi » ? La réponse est relative à la pression ambiante de l'air qui nous entoure, en gris sur le dessin.

La partie inférieure de la figure représente la sortie électrique idéale qui devrait résulter de ces ondes sonores. La tension varie précisément de façon identique à la variation de pression des ondes sonores, fluctuant de part et d'autre d'un niveau de référence de 0 volt correspondant, lui, à la pression de l'air ambiant. Cela a pour conséquence que notre amplificateur opérationnel doit pouvoir accepter des tensions positives et négatives par rapport à une tension de référence. En fait, les amplificateurs opérationnels sont conçus pour cela.

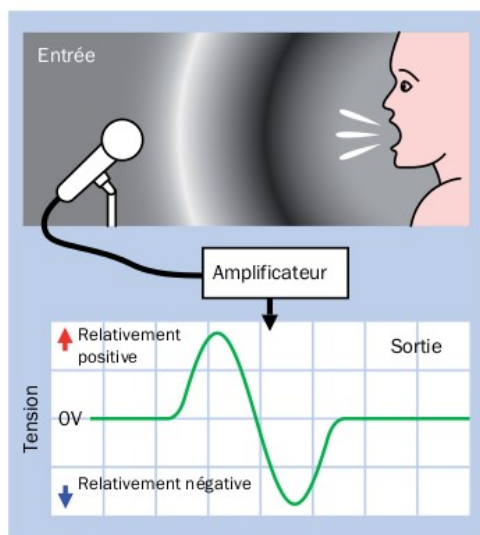


Figure 8-5. Un bon amplificateur devra créer une sortie dont la tension varie selon la variation de pression créée par la source sonore.

De ce fait, ils nécessitent souvent une source de tension symétrique pour leur alimentation. De façon typique, une telle source pourrait produire +12 V DC, 0 V et -12 V DC. Pour notre expérience, nous utiliserons +4,5 V DC, 0 V DC et -4,5 V DC. C'est ennuyeux car la plupart des autres composants ne nécessitent pas une alimentation symétrique et je suis sûr que vous ne souhaitez pas acheter une alimentation séparée juste pour satisfaire les besoins d'un amplificateur opérationnel. Par chance, il existe une solution pour

contourner cela, que je vais appliquer dans notre expérience.

La solution est en théorie assez simple puisque les tensions haute et basse sont uniquement « relatives » à la tension zéro, tout comme les pressions haute et basse le sont par rapport à la pression ambiante. Ainsi, par exemple, au lieu d'utiliser +4,5 V DC, 0 V DC et -4,5 V DC, nous pourrions utiliser + 9V DC, +4,5 V DC et 0 V. Les écarts entre les tensions haute, moyenne et basse seraient identiques, les composants du circuit ne remarqueraient aucune différence.

Or nous ne disposons que d'une pile de 9 V, comment créer dans ce cas cette tension intermédiaire de 4,5 V ? La réponse se trouve sur la fig. 8-6. La partie haute représente ce dont nous avons besoin et la partie centrale comment le réaliser à l'aide d'un simple diviseur de tension constitué de deux résistances d'égale valeur.

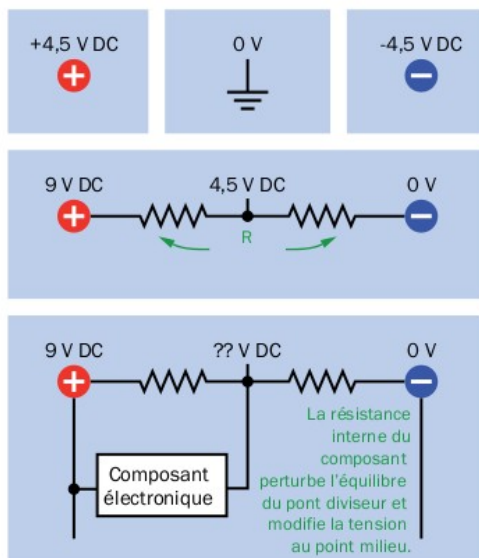


Figure 8-6. Idéalement, un amplificateur opérationnel doit disposer d'une alimentation symétrique relativement au potentiel neutre, représenté par le symbole de masse situé en haut de la figure. L'alimentation symétrique peut être simulée par un diviseur de tension résistif comme illustré au centre. Cependant, la valeur intermédiaire de la tension sera affectée par le courant absorbé par les composants ainsi alimentés, comme montré en bas de l'image.

Il y a malheureusement un problème à cela. Si vous alimentez un composant entre le bus d'alimentation 9 V DC et le point milieu 4,5 V DC du pont diviseur, la résistance interne du composant est maintenant en parallèle avec la moitié gauche du diviseur de tension, comme le montre la partie basse de la fig. 8-6. Seulement, nous ne connaissons pas exactement la valeur de la tension au point central car le composant a modifié la résistance entre l'alimentation positive et le point milieu du diviseur de tension. Cela aura tendance à augmenter la tension du point milieu au-delà de 4,5 V DC.

La meilleure façon de nous en sortir est d'utiliser une résistance de faible valeur alors que le composant relié au point milieu du pont diviseur devrait avoir une résistance interne aussi élevée que possible. Cela aura toujours une conséquence sur la tension au point milieu, mais son effet sera réduit. Je reviendrai sur ce problème dans notre prochaine expérience.

Des millivolts aux volts

Dans l'expérience précédente, vous avez vérifié que votre électret fonctionnait. Nous allons maintenant l'utiliser pour quelque chose d'utile.

Mise en place d'un condensateur

La première étape consiste à placer un condensateur de liaison, comme indiqué sur la fig. 9-1. Si vous vous rappelez les bases, vous savez déjà que le condensateur bloque la tension continue tout en se laissant traverser par les signaux alternatifs. En fait, selon la valeur du condensateur, il sera transparent au passage de la plupart des faibles variations de tension – telles que celles d'un signal audionphonique.

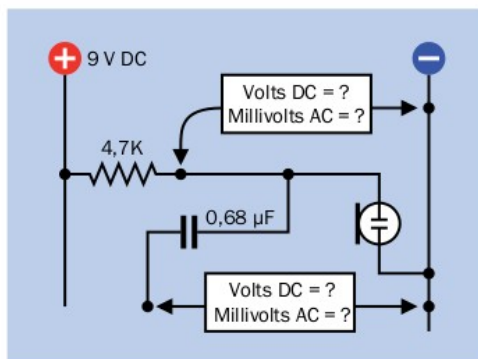


Figure 9-1. Ce simple test avec un multimètre démontre que le condensateur bloque la tension continue mais transmet le signal alternatif d'un son.

Dans un premier temps, essayez de mesurer la tension continue (relative à la masse), au-dessus, puis en dessous du condensateur. Vous devriez constater que la tension mesurée en haut est à peu près identique à celle de votre pile. En bas, vous évaluez seulement une fraction de volt car le condensateur bloque la tension continue. (Si le condensateur remplit parfaitement ce rôle, vous ne devez obtenir aucune tension.)

Maintenant, si vous réglez votre multimètre pour mesurer des tensions alternatives en millivolts, vous devriez relever des valeurs identiques au-dessus et en dessous du condensateur. La leçon est simple.

- Le condensateur supprime la composante continue de 9 V du signal.
- Le condensateur permet à la tension alternative du microphone de la traverser.

Nous ne souhaitons pas que notre amplificateur augmente la tension continue. En revanche, nous voulons qu'il amplifie le signal pulsé du microphone. Le condensateur est donc exactement ce dont nous avons besoin pour coupler un microphone à un amplificateur.

Si vous vous demandez pourquoi le condensateur doit avoir une valeur de 0,68 µF, il s'agit d'une question plus délicate. Une valeur plus importante devrait en principe mieux convenir à ce type d'application mais les condensateurs de fortes valeurs ont tendance à être plus chers. Par ailleurs, un condensateur de plus faible valeur transmettra mieux les fréquences élevées, ce qui est souhaitable. Vous pouvez essayer différentes valeurs de capacité, répétez le test du « Aaah » et voyez si vous mesurez des valeurs différentes.

Présentation de l'amplificateur opérationnel

Il est maintenant temps d'amplifier le signal du microphone. Pour cela, un transistor bipolaire n'est pas le composant idéal car il amplifie le courant plutôt que la tension. Or nous avons besoin d'un amplificateur de tension. Nous avons vu dans l'expérience 6 qu'un comparateur amplifie une tension car son alimentation ne doit pas nécessairement être identique à la tension appliquée à sa sortie collecteur ouvert. Un amplificateur opérationnel fonctionne de la même façon. Il peut convertir les plus ou moins 20 millivolts de votre microphone en un signal de sortie de plus ou moins 2 à 3 volts.

Je vais utiliser un LM741 comme amplificateur opérationnel. Il s'agit de l'un des plus anciens circuits intégrés disponibles mais il est toujours fabriqué en grande quantité car il est économique, facile à approvisionner et fonctionne parfaitement. Son brochage est précisé sur la fig. 9-2 et vous remarquerez que, contrairement au LM339 qui contenait quatre comparateurs, il ne comporte qu'un seul amplificateur opérationnel. Comme déjà mentionné, le symbole d'un amplificateur opérationnel est identique à celui d'un comparateur, car ils fonctionnent tous deux par comparaison de deux entrées. Si vous observez un schéma et vous demandez si le symbole triangulaire identifie un amplificateur opérationnel ou un comparateur, la référence du composant et le texte d'accompagnement devraient éclaircir ce point.

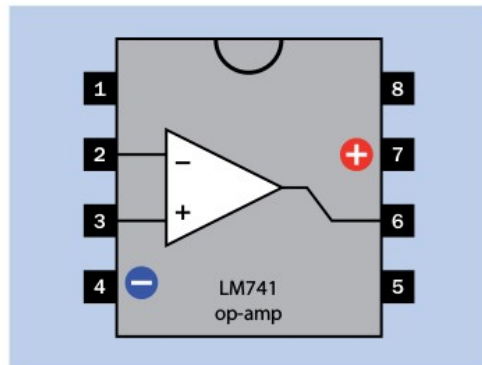


Figure 9-2 Brochage d'un amplificateur opérationnel LM741. Les broches 1 et 5 servent au calibrage mais sont rarement utilisées. La broche 8 n'est pas reliée au composant interne.

Quelle est la différence ?

Pour cela, voici mon plan. J'applique une tension de 4,5 VCC à l'entrée inverseuse de l'ampli-op (celle avec le signe « - ») en utilisant un diviseur de tension. Il s'agit de ma tension de référence. Je règle séparément une tension de 4,5 VCC à l'entrée non inverseuse (celle avec le signe « + ») en utilisant un autre diviseur de tension et j'y ajoute le signal de mon microphone (au travers du condensateur de liaison). La tension de l'entrée non inverseuse devient alors variable au-dessus et en dessous du niveau 4,5 VCC. Cela est illustré, en haut, sur la fig. 9-3 où le signal d'entrée correspond à la ligne ondulée verte et la tension de 4,5 V à la ligne noire horizontale.

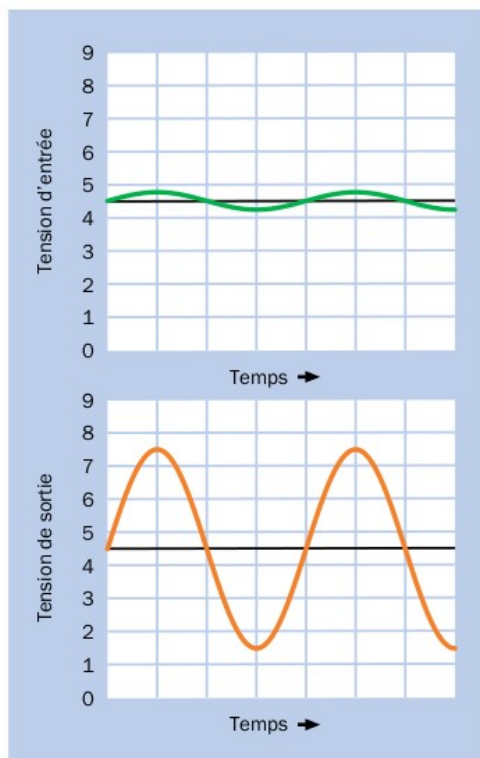


Figure 9-3. Le principe de base d'un ampli-op est d'amplifier la différence entre un signal d'entrée et une tension de référence (4,5 V dans cet exemple). L'entrée est représentée en vert, la sortie en orange et la tension de référence par la ligne horizontale noire. Les variations de la ligne verte ont été exagérées afin de les rendre visibles.

L'amplificateur opérationnel amplifie la différence entre l'entrée non inverseuse et la tension de référence de l'entrée inverseuse, créant le signal de sortie représenté dans la moitié basse de la figure.

Pour que le tout fonctionne, la même tension de référence doit être attribuée aux deux entrées de l'ampli-op, le signal en provenance du microphone étant ajouté à l'une d'entre elles. Pour cela, j'ai besoin de deux alimentations de la même valeur. Je peux utiliser deux diviseurs de tension séparés, mais pour être sûr qu'ils délivrent la même tension, les deux résistances de chaque diviseur doivent être précisément calibrées entre elles.

Le circuit est représenté sur la fig. 9-4. Il peut être intégré au montage du test simplifié de votre électret, réalisé précédemment.

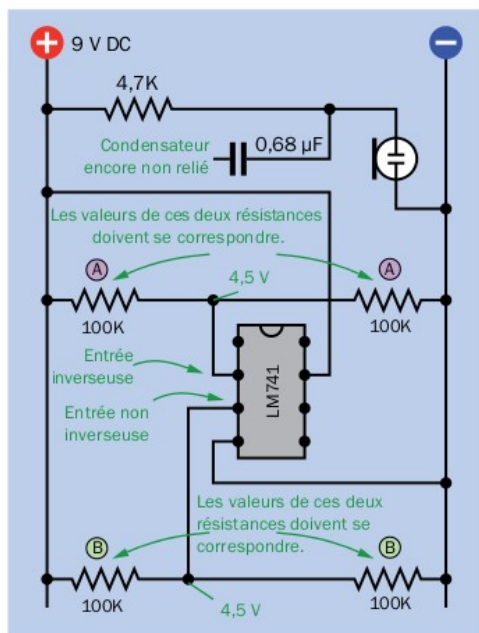


Figure 9-4. Création des deux diviseurs de tension pour vérifier l'amplificateur opérationnel. Si votre pile ne délivre pas exactement 9VCC, la tension au point milieu du diviseur A ne sera pas exactement 4,5VCC. Elle doit être la moitié de la tension de la pile. (Ce circuit est conçu pour clarifier comment un ampli-op fonctionne, ce n'est pas un montage applicatif réel.)

Le microphone n'est pas encore connecté. Je vais y venir à l'étape suivante. Nous devons d'abord nous confronter au problème du calibrage des deux résistances.

Une paire parfaite

En raison des imperfections de fabrication, la valeur réelle des résistances peut varier. Si elles présentent une tolérance de 5 %, des résistances de 100K pourront avoir une valeur comprise entre 95K et 105K. Quand bien même seraient-elles fabriquées avec une tolérance de 1 %, leurs valeurs varieraient entre 99K et 101K.

Pour résoudre ce problème, vous devez utiliser votre multimètre afin de trouver une « paire assortie » de résistances. Voici comment procéder.

Mesurez la valeur d'une dizaine de résistances de 100K. Choisissez-en deux ayant la même valeur, au moins dans les limites de précision de votre multimètre. Peu importe la valeur de ces résistances, ce qui importe est qu'elles soient pratiquement identiques. Utilisez-la en tant que paire « A » sur la fig. 9-4.

Choisissez une autre paire ayant une valeur identique et utilisez-la en tant que paire « B ». Afin d'éviter toute confusion, soyez méthodique en mesurant vos résistances jusqu'à ce que vous trouviez les deux paires de résistances nécessaires comme indiqué sur la fig. 9-5.

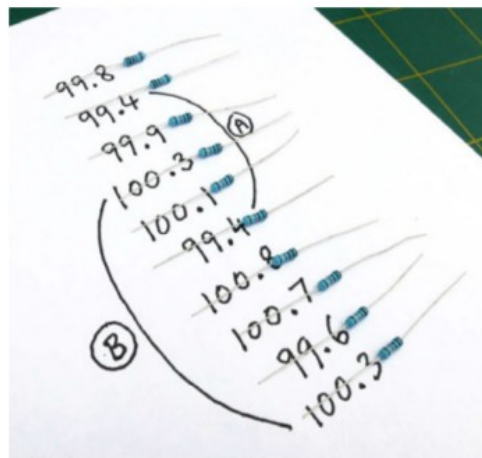


Figure 9-5. Recherche de deux paires de résistances de 100K de valeurs identiques.

Notez qu'il n'est pas nécessaire que les résistances de la paire « A » aient la même valeur que celles de la paire « B ». Les résistances de la paire « A » doivent être identiques, il en va de même pour celles de la paire « B ».

Vous vous demandez si vous devez consacrer ce temps important pour choisir les résistances chaque fois que vous utiliserez un amplificateur opérationnel ? Non, définitivement non ! L'appariage de résistances est nécessaire uniquement pour ce circuit de test, car il servira ultérieurement pour effectuer des mesures précises des performances de l'amplificateur opérationnel. De plus, disposer de deux diviseurs de tension facilite la compréhension du comportement de ce circuit.

Lors de la mesure des résistances ne reliez pas les points de touche de votre multimètre aux fils de la résistance alors que vous la tenez entre vos doigts. La résistance de votre peau modifiera la valeur mesurée. Posez plutôt chaque résistance sur une surface isolante, en plastique, en papier, en carton ou en bois, avant de relier le multimètre à ses fils. Vous pouvez également insérer la résistance dans le petit montage de test des résistances décrit dans l'introduction de cet ouvrage. Reportez-vous à la fig. I-16.

Mesure de la sortie

Quand vous aurez réalisé le circuit de la fig. 9-4, vérifiez les tensions aux entrées inverseuse et non inverseuse, par rapport à la masse. Elles devraient être toutes les deux égales à la moitié de la tension de votre pile (qui pourrait être plus ou moins égale à 9 V DC). S'il y a une petite différence, n'y prêtez pas attention. Si la différence est plus conséquente (l'une étant par exemple à 4,7 VCC et l'autre à 4,4 VCC), c'est que vous n'avez pas choisi vos paires de résistances avec suffisamment de précautions.

Vous voici maintenant prêt à compléter le circuit en y reliant le microphone, comme illustré sur la fig. 9-6.

Vous pouvez voir, sur la fig. 9-7, le circuit réalisé sur une plaque de montage.

Le microphone est relié à l'entrée non inverseuse de l'ampli-op par l'intermédiaire du condensateur de liaison et d'une résistance de 1K. La sortie de l'amplificateur a également un condensateur de liaison et vous mesurez son signal à l'aide de votre multimètre réglé cette fois pour la mesure de tensions alternatives en volts et non en millivolts, puisque le signal va être amplifié.

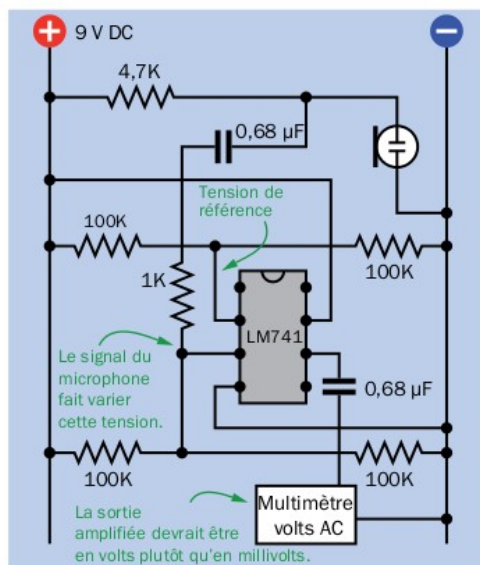


Figure 9-6. Circuit complet permettant la vérification des performances de l'ampli-op à l'aide d'un microphone électret.

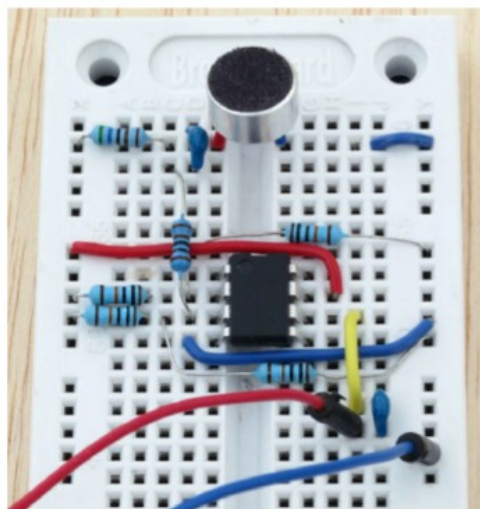


Figure 9-7. Circuit permettant d'évaluer la sortie amplifiée d'un microphone électret. Les fils rouge et bleu sous le circuit intégré sont reliés au multimètre afin de mesurer une tension en volts. L'alimentation pour les bus de la plaque de montage provient d'une pile de 9V (non représentée).

Notez que contrairement au comparateur LM339 qui possède une sortie à collecteur ouvert et nécessite une résistance de rappel, le LM741 a une « vraie » sortie capable de délivrer un faible courant. Aucune résistance de rappel ne lui est nécessaire.

Si vous aviez relié votre multimètre entre la broche de sortie et le point intermédiaire du diviseur de tension « A », vous auriez mesuré les écarts de tension de part et d'autre de la tension de référence.

Mais la sortie de l'ampli-op étant transmise au travers d'un autre condensateur de liaison, la composante continue du signal est bloquée, il est donc possible de mesurer le signal par rapport à la masse.

Faites à nouveau « Aaah » devant le microphone et maintenez le son pour laisser le temps à votre multimètre de se stabiliser. Vous devriez découvrir qu'une tension d'entrée d'environ 20 mV en provenance du microphone devrait créer une tension de sortie supérieure à 2 V. L'ampli-op augmente la tension dans un rapport de plus de 100:1. Ce rapport est son *gain*.

Comment pouvons-nous maintenant utiliser cette sortie amplifiée ? Nous pouvons le faire de différentes manières, commençons par notre prochaine expérience.

Vous êtes maintenant en mesure de concevoir une diode LED activée par un bruit. La fig. 10-1 présente le même circuit que précédemment, auquel cinq composants ont été ajoutés. Le montage est photographié sur la fig. 10-2.

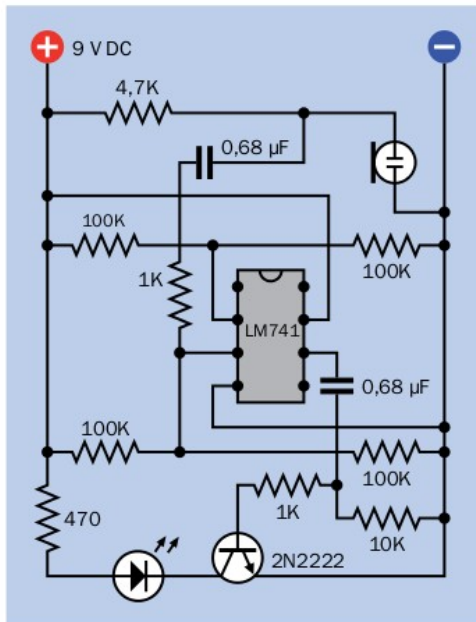


Figure 10-1. Ce circuit de test avec amplificateur opérationnel allume la diode LED lorsque l'électret capte un son modéré.

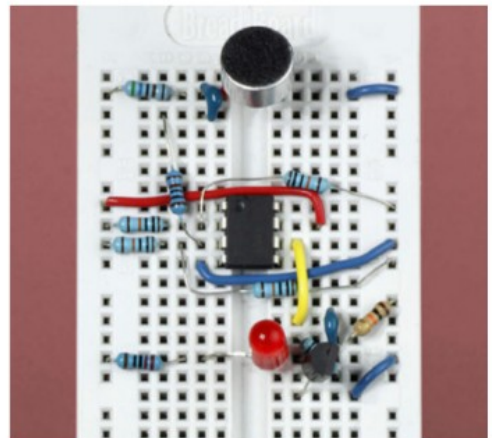


Figure 10-2. Montage du circuit à LED activée par le bruit (la pile de 9 V n'est pas présente.)

Combinaison LED-transistor

Après avoir traversé le condensateur de liaison, la sortie du LM741 est reliée au point milieu entre la résistance de 1K et celle de 10K. En conséquence, les fluctuations créées par l'ampli-op sont maintenant relatives à la masse. Elles transitent via une résistance de 1K vers la base de ce bon vieux transistor 2N2222. Ce dernier réagit en amplifiant le courant qui traverse ensuite une LED.

Le circuit illumine maintenant la LED en synchronisation avec votre voix, lorsque vous parlez devant le microphone. Je ne sais pourquoi mais je trouve ça magique. Peut-être suis-je facilement enthousiasmé ? Si vous ne partagez pas mon sens de la magie face à des choses si

simples, soyez rassuré, nous venons juste de débiter un projet menant à un circuit plus ambitieux.

Si le circuit ne se comporte pas comme je l'ai décrit, voici une liste des causes probables.

La LED ne s'allume pas

C'est probablement le résultat d'un câblage erroné. Vérifiez lentement et avec précaution l'ensemble et utilisez votre multimètre à chaque niveau du circuit, en vous rappelant de contrôler les tensions alternatives et continues.

La LED s'illumine en permanence

Cela ne devrait pas arriver, néanmoins, des différences dans les composants peuvent produire des effets inattendus. Le transistor 2N2222 utilisé et la LED en particulier peuvent affecter légèrement le comportement du circuit. Si votre LED reste allumée, le problème est probablement dû à la tension de la base du transistor dont le niveau, même en l'absence de signal en provenance de l'ampli-op, peut être suffisant pour permettre le passage d'une intensité de son collecteur vers son émetteur. Remplacez la résistance de 1K reliée à la base du transistor par une autre de plus forte valeur, le problème devrait disparaître.

La LED clignote régulièrement

L'amplificateur opérationnel peut être à l'origine de cette sorte d'oscillation. Lorsque la LED est allumée,

elle consomme davantage de courant, ce qui pourrait faire chuter la tension de la pile. Cette baisse affecterait alors la tension des diviseurs de tension. Une plus faible différence de tension provoquerait une diminution de la luminosité de la LED, celle-ci consommant moins de courant, la tension de la pile augmenterait et le cycle se répéterait. Cela se produira surtout si vous faites un bruit relativement faible devant le microphone. Cela devrait moins être le cas si vous alimentez le circuit à l'aide d'un adaptateur secteur, la tension continue qu'il génère étant plus stable que celle d'une pile.

Avant de poursuivre, vous pouvez essayer autre chose. Retirez la LED et branchez à sa place un petit haut-parleur. Tenez le haut-parleur près de votre oreille. Lorsque vous parlez devant le microphone, vous devriez entendre une version faible, réellement horrible et grésillante de votre voix qui serait d'ailleurs susceptible de souffrir des mêmes oscillations que celles évoquées précédemment.

Vous aurez besoin d'un haut-parleur ayant une impédance relativement élevée pour que cela fonctionne. J'ai pu obtenir un résultat avec un haut-parleur de 63 Ω . Si vous tentez d'augmenter la puissance du son en réduisant la valeur de la résistance de 470 Ω , vous trouverez probablement que le son émis par le haut-parleur est encore plus distordu. Pourquoi est-il si mauvais ? Pour y remédier, il est nécessaire d'utiliser la contre-réaction négative que j'ai évoquée précédemment.

Le besoin de négation

Maintenant que vous savez qu'un amplificateur opérationnel peut amplifier, je voudrais poser deux questions.

1. Comment peut-on mesurer la puissance de son amplification ?
2. Comment la sortie pourrait délivrer une copie plus précise de l'entrée, de telle sorte que si nous l'écoutons avec un haut-parleur, le son ne semble pas grésillant ?

Dans cette expérience, je vous guiderai pour répondre à la première question. Je répondrai à la seconde dans l'expérience 12.

Mesures perturbantes

Dans un monde idéal, mesurer la puissance d'amplification d'un ampli-op serait aisé. Il suffirait d'un générateur de signal pour créer une entrée sinusoïdale constante, ainsi que d'un oscilloscope pour visualiser la sinusoïde sur son écran. Vous pourriez déterminer son amplitude grâce à l'échelle graduée de son écran, puis vous feriez de même avec le signal de sortie. Pour calculer le rapport d'amplification, il faudrait diviser l'amplitude du signal de sortie par celle du signal d'entrée. Simple n'est-ce pas ?

L'amplitude d'un signal indique sa grandeur, bien que ce ne soit pas si simple lorsque l'on est confronté à des signaux pulsés de formes complexes. Il peut s'agir de la tension maximale des impulsions, leur valeur moyenne, ou la moyenne quadratique de sa tension. Je vous laisse le soin de découvrir vous-même cette dernière, si cela vous intéresse.

Malheureusement, la plupart des gens n'ont pas de générateur de signaux ou d'oscilloscope à disposition. Est-il possible d'évaluer la performance de votre ampli-

op en n'utilisant qu'un simple multimètre ? Je pense que oui, mais ce n'est pas évident car l'appareil ne réalise pas des mesures précises du signal produit par le microphone lorsque vous émettez le son « Aaah ».

La réponse à ce problème est d'ignorer les signaux pulsés pour le moment. Si l'on retire les condensateurs installés pour bloquer les tensions continues, l'amplificateur opérationnel sera en mesure d'amplifier une différence de tensions stables et vous pourrez utiliser votre multimètre pour la mesurer.

Le pourrez-vous ? On rencontre un deuxième problème : le simple fait de toucher une entrée de l'amplificateur opérationnel avec votre cordon de mesure pourrait modifier légèrement la tension et, cela étant amplifié, deviendrait une forte variation du signal. Comme je l'ai mentionné dans l'expérience 2, les mesures affectent les mesures. Tenter de connaître une tension changera cette tension.

Par chance, il existe des moyens de contournement, et je pense que la manière de résoudre ce problème est en elle-même intéressante et instructive. Alors allons-y !

Amplification en courant continu

Au risque d'être désagréable, je vais vous demander de retirer et mettre de côté quelques composants installés précédemment. Le nouveau circuit que je voudrai vous faire réaliser est schématisé sur la fig. 11-1 page suivante. Soyez attentif à ce qu'il ne reste aucun composant du précédent montage qui pourraient entraîner une certaine confusion.

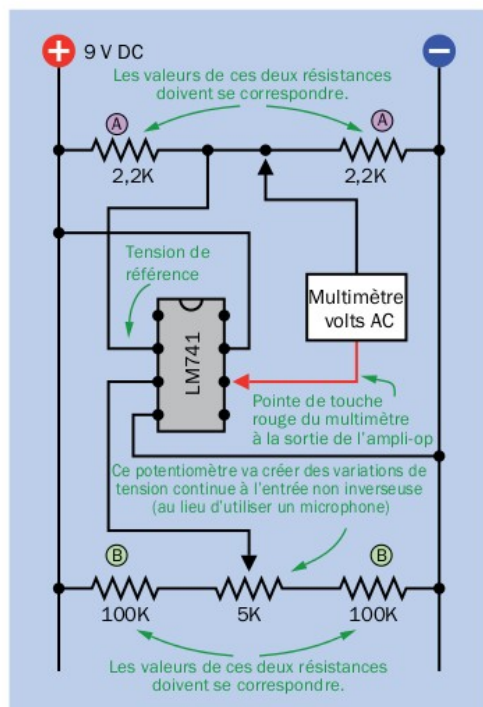


Figure 11-1. Un circuit simple permettant d'évaluer la performance d'un ampli-op.

Notez que vous devez maintenant recourir à deux résistances de 2K2 dans le diviseur de tension A. Elles doivent être relativement faibles pour pouvoir absorber une intensité plus élevée à partir de ce diviseur. (Dans l'expérience précédente, il était possible d'utiliser des résistances de 100K car l'impédance de chaque entrée de l'amplificateur opérationnel était très élevée et qu'elle était identiquement répercutée sur chaque diviseur de tension.)

Pour appairer les résistances de 2K2, vous devrez procéder comme pour les résistances de 100K dans l'expérience précédente. Je vous promets que c'est la dernière fois que devrez accomplir cette tâche fastidieuse.

Le microphone et les condensateurs ont été retirés puisque nous ne nous intéressons qu'à l'amplification d'un signal continu dans cette expérience. Sans microphone, comment créer une différence entre les deux

entrées de l'amplificateur opérationnel afin qu'il ait quelque chose à amplifier ?

Le potentiomètre de 5K le permet. Remarquez qu'il est inséré entre les deux résistances B. En ajustant le potentiomètre, vous modifiez l'équilibre du diviseur de tension et faites varier la tension de l'entrée non inverseuse. Lorsque vous tournez le potentiomètre dans un sens ou dans l'autre, il se comporte comme un microphone dont le signal d'entrée est si lent que votre multimètre peut s'en accommoder.

Réduisez le plus possible la longueur des fils des résistances de ce circuit afin d'éviter qu'elles ne captent les champs électromagnétiques ambiants qui seraient amplifiés par l'ampli-op. Conservez vos résistances plaquées sur la platine de montage. Rappelez-vous qu'un amplificateur opérationnel amplifiera aussi bien les parasites que le signal utile qui lui est appliqué.

Après avoir construit le circuit, reliez le fil rouge de votre multimètre à la broche de sortie de l'ampli-op, tandis que le fil noir sera relié à la liaison entre les deux résistances A. N'oubliez pas de régler votre multimètre pour la mesure de tensions continues !

Les secrets de l'amplification

Vous mesurez maintenant la différence de tension entre la sortie de l'amplificateur et une tension de 4,5 V DC. Si le signal issu de l'ampli-op est faible, vous devriez mesurer une tension relative de valeur négative. Par chance, presque tous les multimètres sont capables d'afficher des valeurs négatives aussi simplement que les valeurs positives. En revanche, il s'agit d'être attentif à la présence du signe moins sur l'écran de l'appareil.

Vous pouvez vous amuser avec ce circuit en faisant varier lentement le potentiomètre tout en observant la tension indiquée par votre multimètre. Je parie qu'elle sautera brusquement d'une valeur positive à une valeur négative en réglant le potentiomètre autour de sa position moyenne. Pourquoi cela ?

La partie supérieure de la fig. 11-2 ci-contre a été tracée à partir des valeurs que j'ai mesurées avec ce circuit. Le multimètre indiquait des valeurs en volts mais je les ai converties en millivolts afin que les unités employées sur le graphique de l'entrée soient les mêmes que pour celui de la sortie.

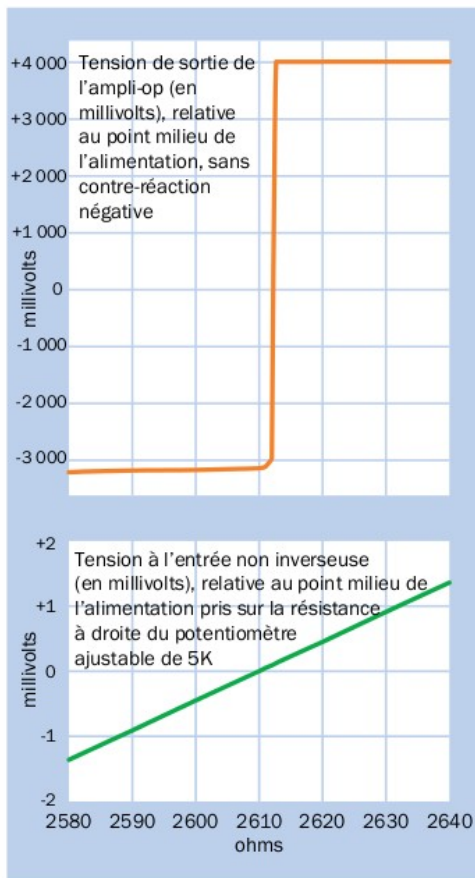


Figure 11-2. La co du bas montre une progression linéaire de la tension appliquée à l'entrée non inverseuse d'un ampli-op. La courbe du haut montre la sortie relative à la tension intermédiaire de l'alimentation de l'amplificateur.

Comme vous pouvez le constater, la tension de sortie passe d'un extrême à l'autre. Ceci est dû au fait que l'amplificateur opérationnel amplifie très fortement le signal. La résistance du potentiomètre étant proche de sa valeur moyenne, la moindre variation de tension provoque une forte réaction de l'amplificateur.

Si vous aviez remplacé le potentiomètre ajustable de 5K par un de 5 ohms (si vous en trouvez un !), vous auriez sans doute pu aplatir la courbe de sortie, sans toutefois la rendre vraiment similaire à celle de l'entrée et la forte

amplification du circuit aurait tendance à augmenter les bruits parasites. Cela n'a pas d'importance, tant que vous voulez uniquement allumer une diode LED, mais ce n'est pas très adéquat pour la reproduction fidèle d'un son audiophonique. Nous avons besoin d'un signal de sortie ayant exactement la même forme que celui de l'entrée. En d'autres termes, ils devraient présenter une correspondance linéaire.

Pour y parvenir, il suffit d'appliquer une contre-réaction négative. Alors que la contre-réaction positive était utile pour rationaliser la sortie d'un comparateur, une contre-réaction négative permet de mettre un peu d'ordre au niveau de la sortie d'un amplificateur opérationnel.

Observez la courbe sur la fig. 11-3 page suivante : une entrée linéaire engendre une sortie précisément linéaire. C'est exactement ce que nous voulons et, bonne surprise, c'est facile à obtenir. Pour vous en rendre compte par vous-même, appliquez les modifications suivantes à votre circuit.

- Retirez le fil qui relie les deux résistances A à l'entrée inverseuse de l'ampli-op.
- Ajoutez deux résistances, identifiées F et G sur la fig. 11-4. La fig. 11-5 représente ce circuit réalisé sur une plaque de montage.

La résistance F de valeur 1M est la résistance de contre-réaction négative, elle est reliée à la sortie de l'ampli-op et la retourne vers l'entrée inverseuse. Voici le principe.

- Lorsque vous utilisez un comparateur, vous réalisez une contre-réaction positive en réinjectant une partie du signal de sortie sur l'entrée non inverseuse.
- Vous utilisez maintenant un amplificateur opérationnel et vous réalisez une contre-réaction négative en réinjectant une partie du signal de sortie à l'entrée inverseuse.

La résistance de 10K est une « résistance de retour à la masse ». En réalité, elle n'est pas reliée directement à la masse du montage mais au point milieu entre les résistances A, car l'amplificateur utilise ce point comme tension de référence.

Prenez soin d'appliquer les modifications au circuit. Maintenant, lorsque vous tournez le réglage du potentiomètre, vous constatez que le multimètre indique une variation lente et progressive de la tension de sortie. La sortie ne saute plus d'un extrême à l'autre.

Sur la fig. 11-3, de petites variations de la ligne orange (pouvant être visibles ou non dans le circuit reproduit) résultent sûrement des imperfections dans les mesures effectuées. Sur une plaque de montage, chaque connexion possède une faible résistance et le simple fait de faire bouger un composant change la mesure en cours, au moins très faiblement.

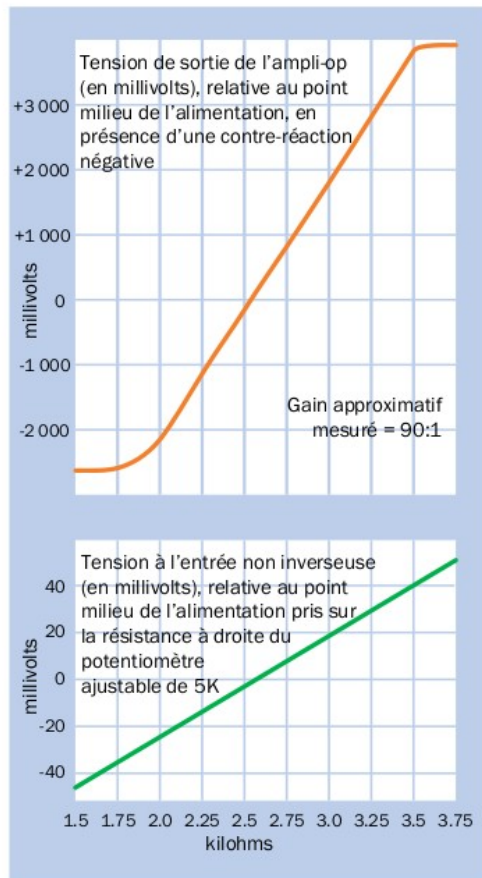


Figure 11-3. La partie centrale de la courbe verte de l'entrée est maintenant reproduite correctement à la sortie, grâce à la contre-réaction négative.

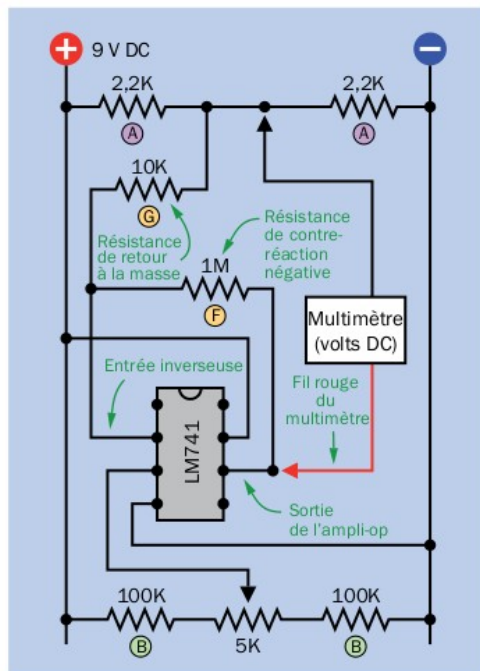


Figure 11-4. Le schéma précédent a été modifié afin d'introduire une contre-réaction négative en ajoutant deux résistances.

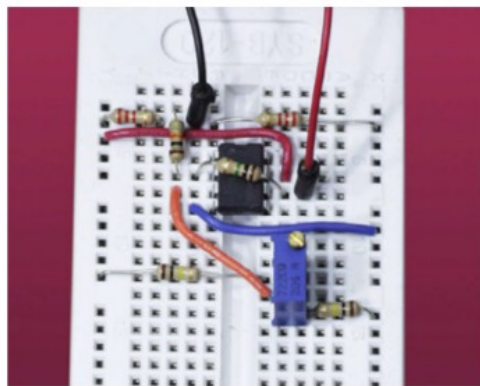


Figure 11-5. Réalisation du schéma précédent permettant de régler et mesurer la contre-réaction. Les fils rouge et noir sont reliés au multimètre réglé pour la mesure des tensions.

Parfait, mais comment fonctionne donc la contre-réaction négative ?

Stimulant électronique

Un amplificateur opérationnel est capable de développer un gain énorme de l'ordre de 100 000:1. Cependant, la contre-réaction négative va réduire ce gain de la manière suivante.

- Si l'entrée non inverseuse est légèrement plus positive que l'entrée inverseuse, la tension de sortie de l'ampli-op augmente.
- Une fraction de la tension de sortie réintroduite à l'entrée inverseuse réduit la différence de tension entre les deux entrées.
- Une réduction de la différence de tension entre les deux entrées provoque une baisse de la tension de sortie de l'ampli-op.

En d'autres termes, lorsque l'ampli-op surrégit, la contre-réaction négative le calme.

Que se passe-t-il si l'entrée non inverseuse a une tension très légèrement inférieure à celle de l'entrée inverseuse ? Dans ce cas, la sortie baisse et une fraction est réinjectée à l'entrée inverseuse, en réduisant la tension ce qui, à nouveau, réduit la différence entre les deux entrées.

Il faut prendre en compte un paramètre supplémentaire, qui est celui de la résistance de retour à la masse identifiée G sur la fig. 11-4. Elle dévie une partie de la contre-réaction négative vers le point A du diviseur de tension. Cela peut être exprimé différemment.

- La contre-réaction négative empêche la sortie d'être hors-contrôle.
- La résistance de retour à la masse empêche la contre-réaction négative d'être démesurée.

Gain

Le terme « gain » est généralement utilisé au-lieu de « facteur d'amplification » car il est plus court.

Il est possible de démontrer mathématiquement que le gain d'un amplificateur peut être déduit d'une formule réellement simple, utilisant les valeurs des résistances F et G :

$$\text{Gain} = 1 + (F / G)$$

Si cela n'est pas totalement clair pour vous, observez la fig. 11-6, sur laquelle est représentée la partie importante du circuit de contre-réaction négative. Vous remarquerez que les résistances F et G constituent, en fait, un nouveau pont diviseur de tension.

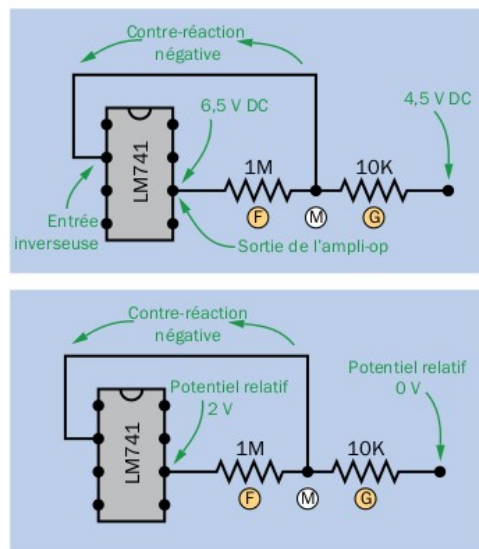


Figure 11-6. Représentation d'une partie du circuit de test de l'ampli-op afin de clarifier le rôle des deux résistances qui contrôlent la contre-réaction négative.

En haut de la figure, j'ai représenté les tensions telles que vous pourriez les mesurer. En bas, elles sont converties pour simplifier le calcul qui suit. Si la sortie de l'amplificateur est à 6,5 V DC et l'autre extrémité de la résistance G est à 4,5 V DC, c'est la même chose, relativement, que si la sortie est à 2 V DC et que l'autre extrémité de la résistance G se trouve au potentiel 0 V DC.

Reportez-vous à la section « Tension et amplification en courant » page 17 pour vous remémorer la formule de calcul de la tension au point milieu d'un diviseur de tension. J'utilise ici F et G au lieu de R1 et R2 pour identifier les résistances. Si V_m est la tension au point milieu, alors :

$$V_m = V * (G / (F + G))$$

La lettre V exprime la tension de sortie de l'ampli-op à l'extrémité gauche de la paire de résistances. Vcc (comme dans la précédente version de cette formule)

ne doit être utilisée que lorsqu'il s'agit de la tension d'alimentation totale. Ici, V représente seulement la tension à l'extrémité gauche, relative à la tension de l'extrémité droite.

Maintenant, si j'intègre les valeurs des tensions qui apparaissent sur la fig. 11-6, j'obtiens ceci :

$$V_M = 2 * (10 / (1\ 000 + 10))$$

Ce qui fait environ 0,02 volt.

Supposons que je modifie la résistance de contre-réaction de 1M à 100K. La formule devient alors :

$$V_M = 2 * (10 / (100 + 10))$$

Cela fait maintenant environ 0,2 volt.

En d'autres termes, quand je diminue la valeur de la résistance de contre-réaction (tout en conservant la valeur de la résistance de retour à la masse), la contre-réaction augmente d'un facteur de 10 alors que le gain de l'amplificateur est réduit dans la même proportion.

Imaginons maintenant qu'au lieu de réduire la valeur de la résistance de contre-réaction négative F , je l'augmente. Supposons en fait qu'elle devienne pratiquement infiniment élevée. En ce cas, la tension de contre-réaction négative sera proche de zéro. C'était le cas lorsque le réseau de contre-réaction n'existait pas et que la liaison entre la sortie et l'entrée n'était que l'air ambiant. C'est pour cela que l'amplificateur opérationnel se comportait d'une manière aussi extrême : aucune contre-réaction négative ne lui était appliquée. La règle générale est la suivante.

- Quand la valeur de la résistance de contre-réaction diminue comparativement à celle de retour à la masse, la contre-réaction négative augmente et le gain de l'amplificateur diminue d'autant.
- Quand la valeur de la résistance de contre-réaction augmente par rapport à celle de retour à la masse, la contre-réaction négative diminue et le gain de l'amplificateur augmente d'autant.

Fondamentaux : origines de la contre-réaction négative

Si la contre-réaction négative semble être une idée simple, elle a été pourtant controversée lors de son développement par les laboratoires Bell dans les années 1930. En réalité, le bureau des brevets s'oppo-

sait au dépôt d'une invention qui semblait ne pas avoir d'utilité. Les amplificateurs sont faits pour amplifier, à quoi bon vouloir en réduire le gain ? Or, comme nous l'avons vu, il existe une excellente raison. C'est un moyen très simple de contrôler la sortie et de la forcer à correspondre au signal d'entrée.

Le concept de la contre-réaction négative a été créé pour les amplificateurs, bien avant que les amplificateurs opérationnels n'existent. En fait, l'ampli-op n'était même pas appelé ainsi jusqu'en 1947 où il fut alors utilisé dans les ordinateurs analogiques pour réaliser les opérations mathématiques (d'où son nom « amplificateur opérationnel »).

Alors que les tubes à vide étaient utilisés, la multitude de composants requis dans un ampli-op occupait beaucoup d'espace et générait une chaleur élevée. Les ampli-op n'étaient pas très sophistiqués et donc peu utilisés jusque dans les années 1960 et l'apparition des circuits intégrés qui les ont rendus économiques et pratiques.

Repousser les limites

En observant la fig. 11-3, on s'aperçoit que la ligne orange est aplatie à chaque extrémité, ce qui semble indiquer que les performances linéaires chutent. C'est effectivement le cas, mais il y a une bonne raison à cela. La plage des tensions de sortie d'un amplificateur opérationnel ne peut pas être plus grande que la tension délivrée entre la ligne positive et la ligne négative de son alimentation. En fait, les tensions mini et maxi de sortie de l'ampli-op seront toujours légèrement inférieures à celles de son alimentation, car l'ampli-op absorbe une partie de ces tensions pour son fonctionnement. En conséquence, si vous augmentez l'entrée au-delà d'une certaine valeur, vous n'obtenez pas une tension de sortie plus grande. Lorsque cela se produit en présence d'un signal audio, vous entendez une distorsion du son.

Sur la fig. 11-7 ci-contre, la courbe supérieure représente un signal d'entrée en vert, et le signal de sortie en orange qui lui est superposé. La hauteur de la flèche orange divisée par la hauteur de la flèche verte vous indique le gain obtenu. L'amplificateur opérationnel utilisé semble présenter une forte contre-réaction négative car son gain est limité à 6:1. Que se passe-t-il alors si nous réduisons la contre-réaction négative ? L'entrée n'est plus soumise à un contrôle aussi important, elle devient donc légèrement plus élevée. L'amplificateur essaie de l'amplifier, mais la sortie atteint la tension

maximale avant que le signal d'entrée ne soit à son sommet. En conséquence, le pic de tension de sortie est raboté.

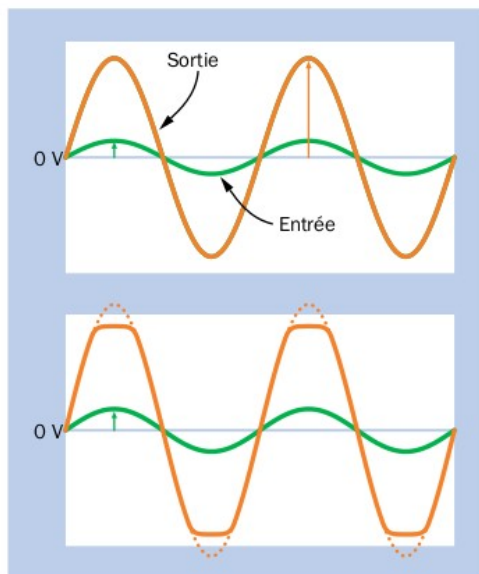


Figure 11-7. Dans le dessin du haut, l'entrée (ligne verte), produit une sortie amplifiée (ligne orange) qui atteint juste les limites de l'amplificateur. Dans le dessin du bas, l'amplitude de l'entrée a augmenté, mais comme la sortie ne peut dépasser les limites imposées par l'alimentation, l'amplificateur écrête la sortie. Les lignes pointillées montrent ce que devrait être le signal de sortie s'il y avait assez de tension d'alimentation pour le créer.

Dans cette situation, l'ampli-op commence à se comporter à la manière d'un transistor qui sature. Il amplifie toujours les parties faibles du signal, mais lorsque ce dernier atteint les pics, il abandonne. On dit alors que l'amplificateur opérationnel est *surmodulé* et opère un *écrêtage*, car les pics du signal sont écrêtés. (J'ai brièvement évoqué ce point dans *L'Électronique en pratique*). S'il s'agit d'un signal audio, il devient haché et désagréable, comme le son d'une guitare au travers d'une boîte à distorsion. En réalité, une boîte à distorsion fonctionne comme un amplificateur surmodulé.

No pain, no gain !

Je veux maintenant revenir sur le sujet de la mesure du gain d'un ampli-op. Pour rappel :

- Le gain est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée.

Sur la fig. 11-8, vous verrez une série de mesures des tensions d'entrée et de sortie que j'ai relevées moi-même, pour différents réglages du potentiomètre du circuit de la fig. 11-4. Ce sont les valeurs que j'ai utilisées pour tracer la courbe de la fig. 11-3. J'ai ensuite utilisé ce graphe pour calculer le gain de mon amplificateur opérationnel.

Résistance de la partie droite du potentiomètre en ohms	Tension de sortie relative au diviseur de tension A en millivolts	Tension à l'entrée non inverseuse relative au diviseur de tension A en millivolts
1 500	-2 630	-47,3
1 750	-2 590	-36,3
2 000	-2 150	-25,2
2 250	-1 140	-14,3
2 500	-160	-3,3
2 750	+810	+7,7
3 000	+1 790	+18,7
3 250	+2 800	+29,7
3 500	+3 810	+40,7
3 750	+3 900	+51,7

Figure 11-8. Ces valeurs mesurées ont servi à tracer le graphe précédent montrant la performance d'un ampli-op avec une contre-réaction négative.

Vous pouvez en faire autant avec votre amplificateur opérationnel. Je vais vous guider pas à pas pour cela. Voici les quatre phases.

- Phase 1.** Effectuez les mesures pour remplir les deux colonnes de gauche du tableau de la fig. 11-8.
- Phase 2.** Calculez votre version de la troisième colonne du tableau. Puisque vous ne pouvez pas mesurer des petites valeurs de tensions d'entrée de votre ampli-op sans le perturber, le calcul des valeurs est une alternative plausible. Il sera juste

nécessaire d'utiliser des opérations arithmétiques élémentaires.

- **Phase 3.** En utilisant les valeurs de votre tableau, vous pourrez alors dessiner les deux courbes telles que celles que j'ai tracées.
- **Phase 4.** Vous obtiendrez le gain de votre ampli-op en comparant les pentes des deux courbes obtenues.

Ces manipulations vous demanderont environ quinze minutes. Êtes-vous prêt ? Voyons comment votre amplificateur opérationnel se comporte.

Phase 1: tensions de sortie

Relier les pointes de touches de votre multimètre à la sortie de votre ampli-op ne le perturbera pas de façon significative, vous pouvez donc mesurer directement la tension de sortie. Rappelez-vous, vous devez déterminer la variation de la résistance du potentiomètre correspondante à chaque changement de la tension de sortie. Voici comment procéder.

Étape 1

Retirez le potentiomètre ajustable de la platine de montage et mesurez la résistance entre son curseur (la broche centrale) et la broche normalement reliée à la résistance de 100K B située à droite, du côté négatif de l'alimentation (voir sur la fig. 11-4). Réglez le potentiomètre jusqu'à obtenir une valeur de 1K5 (1 500 ohms).

Ne touchez pas les extrémités des fils lors de la mesure. Pour cela, utilisez une paire de cordons avec des pinces crocodiles. L'une des pinces de chaque cordon sera reliée à la pointe de touche de votre multimètre, l'autre à la broche du potentiomètre.

Étape 2

Notez la valeur de la résistance du potentiomètre que vous venez de mesurer.

Étape 3

Remplacez le potentiomètre ajustable sur la platine de montage de façon strictement identique à la précédente.

Étape 4

Mesurez la tension de sortie de l'ampli-op en réglant votre multimètre pour la mesure des tensions continues en volts et en positionnant les pointes de touches comme sur la fig. 11-4. Faites bien attention de placer le fil rouge et le fil noir dans les positions indiquées. Regardez attentivement si le signe « - » apparaît avant la valeur affichée.

Étape 5

Écrivez la valeur de la tension de sortie en la convertissant en millivolts en la multipliant par 1 000, c'est-à-dire en déplaçant la virgule de trois chiffres vers la droite. Vous comparerez la tension de sortie et la tension d'entrée ultérieurement, elles partageront ainsi la même unité. Si par exemple votre mesure est -3,5 V, vous écrirez -3 500 millivolts.

Étape 6

Retirez à nouveau le potentiomètre, et réglez le tout en mesurant la valeur de sa partie droite (négative) jusqu'à ce qu'elle augmente de 250 ohms. Retournez à l'étape 2 et répétez-la. Vous devrez ainsi augmenter de 250 ohms, exactement, la valeur de la résistance du potentiomètre à chaque modification. Continuez à faire les mesures jusqu'à ce que la résistance du potentiomètre atteigne la valeur de 3 750 ohms (3K75), ainsi vous pourrez comparer votre tableau avec le mien.

Phase 2: tensions d'entrée

Vous pouvez calculer la tension d'entrée à partir de la valeur des résistances et de la tension d'alimentation. Cela serait plus simple si je pouvais vous le montrer à l'aide d'un multimètre sur une table de travail, mais c'est impossible. Le meilleur moyen reste donc de vous l'expliquer à l'aide du schéma que j'ai dessiné sur la fig. 11-9 ci-contre. Il reprend une partie du circuit de la fig. 11-4 qui contient le diviseur de tension B.

Nous voulons déterminer la tension V_m au point milieu. Elle est identique à celle qui est appliquée à l'entrée non inverseuse de l'ampli-op. Nous allons l'obtenir à partir des trois valeurs du schéma, identifiées par V_{cc} , R1 et R2, ces deux dernières constituant un diviseur de tension. Remarquez que R1 est la valeur de la résistance de gauche *plus* la résistance de la partie gauche du potentiomètre, tandis que R2 est la résistance de droite

plus la résistance de la partie droite du potentiomètre ajustable.

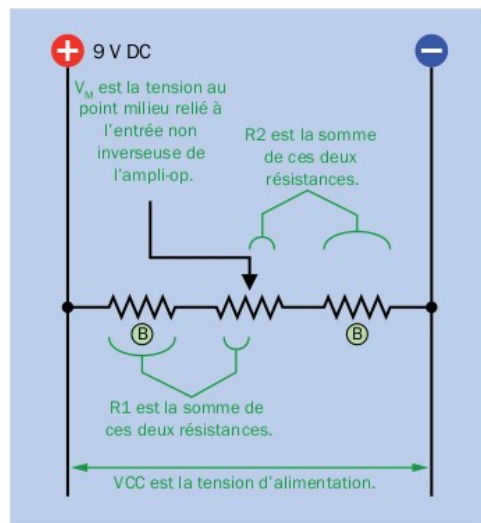


Figure 11-9. La tension de l'entrée non inverseuse de l'amplificateur opérationnel peut être calculée si vous connaissez les valeurs indiquées ci-dessus.

Voici comment procéder.

Étape 1

Mesurez VCC. Réglez pour cela votre multimètre pour la mesure des tensions en volts, et relevez la tension d'alimentation entre ses lignes positive et négative (masse). Si votre pile de 9 V est relativement récente, vous devriez obtenir une valeur au moins égale à 9,2 V. Quoi qu'il en soit, notez cette valeur. Je la nomme VCC, abréviation la plus commune pour désigner une tension d'alimentation.

Étape 2

J'appelle la valeur de la résistance de gauche RL et celle de la résistance de droite RR. Elles devraient être identiques, c'est la raison pour laquelle vous les avez choisies avant de les installer dans votre circuit. Mesurez-les néanmoins après les avoir retirées du circuit. Notez leurs valeurs en ohms (pas en kilohms). Elles devraient atteindre environ 100 000 ohms. Puis réintégrez-les dans votre circuit.

Étape 3

Retirez le potentiomètre du circuit et mesurez sa résistance totale en ohms entre les deux broches extrêmes, en ignorant la connexion centrale. Rappelez-vous de ne pas toucher les fils de mesure ou les connexions durant la mesure.

Mon potentiomètre ajustable de 5K avait en fait une résistance de 5 220 ohms (selon mon multimètre). Le vôtre pourrait indiquer légèrement plus ou moins. La valeur précise n'a pas d'importance tant que vous la mesurez correctement. Je vais l'appeler RT.

Étape 4

Pour trouver R2, ajoutez RR (valeur mesurée de votre résistance de 100K) à la résistance mesurée entre le point de connexion centrale de votre potentiomètre et sa connexion à droite. Cette résistance variait lors de la précédente partie de l'expérience car vous la réajustiez au fur et à mesure. Initialement, elle valait 1 K5, ou 1 500 ohms, alors dans ce cas commencez par cette valeur :

$$R2 = RR + 1\,500$$

Étape 5

Pour déterminer la résistance de la partie gauche du potentiomètre, il suffit de soustraire la résistance de la partie droite de la résistance totale R_T . Sur la fig. 11-9, la partie de droite présentait une résistance de 1 500 ohms, donc :

$$R1 = RL + RT - 1\,500$$

Étape 6

Appliquez maintenant la formule connue pour calculer la tension au point milieu du diviseur de tension :

$$V_M = V_{CC} * (R2 / (R1 + R2))$$

Les variables ont une signification différente que précédemment car j'applique la formule au diviseur de tension B, avec V_w la tension à l'entrée non inverseuse de l'ampli-op. Souvenez-vous, V_{cc} désigne la tension d'alimentation mesurée à l'étape 1. Vous avez ensuite mesuré R2 à l'étape 4 et R1 à l'étape 5, il ne vous reste donc plus qu'à intégrer ces valeurs dans la formule. Je ne peux pas le faire pour vous car je ne connais pas les valeurs exactes de votre résistance de 100K ni celle de votre potentiomètre ajustable de 5K.

Étape 7

V_m est la tension qui aurait dû être appliquée à l'entrée non inverseuse alors que votre potentiomètre était ajusté à 1K5. Mais réfléchissons – l'ampli-op n'amplifiait pas cette tension, mais la différence entre cette tension et la tension de référence. Quelle était la valeur de cette tension (au point milieu du diviseur de tension A) ? Elle aurait dû être exactement la moitié de la tension d'alimentation. Ainsi, pour déterminer la différence de tension aux entrées de l'ampli-op (que j'appelle V_i), vous devez la calculer comme ceci :

$$V_i = (V_{cc} / 2) - V_m$$

Divisez V_{cc} par 2, soustrayez ensuite V_m , et vous obtiendrez la différence de tension entre les deux entrées, que l'on appelle tension différentielle. Elle devrait être négative, pensez à bien préciser le signe « - ». Notez-la dans la troisième colonne, première ligne de votre tableau. Dans le mien, j'ai entré la valeur de -47,3 mV. La vôtre s'en approche-t-elle ?

Tous ces calculs peuvent vous paraître pénibles mais vous n'aurez à les répéter qu'une fois. Comme vous avez ajusté votre potentiomètre par pas égaux de 250 ohms lors des mesures de la phase 1, vous pouvez être à peu près certain que la tension d'entrée a également augmenté par paliers égaux. Autrement dit, la tension d'entrée a évolué selon une ligne droite. De ce fait, il suffit de déterminer la valeur la plus basse et la valeur la plus haute de la tension d'entrée, puis tracer une ligne droite entre ces deux points.

Revenez à l'étape 4 et calculez une nouvelle valeur pour R2 comme ceci :

$$R2 = RR + 3\,750$$

Puis, dans l'étape 5, calculez une nouvelle valeur pour R1 :

$$R1 = RL + RT - 3\,750$$

Utilisez maintenant ces nouvelles valeurs de R1 et R2 lors de l'étape 6 et définissez la valeur de V_i à l'étape 7. Reportez celle-ci dans la troisième colonne, à la dernière ligne de votre tableau.

Phase 3: le tracé

Dans l'expérience 2, je vous ai demandé de tracer la valeur bêta de votre transistor afin d'acquérir un peu d'expérience avant d'atteindre cette section du livre. Pour rappel, vous pouvez trouver du papier quadrillé

sur Internet, avec les arguments « papier millimétré » ou *print graph paper*.

Utilisez une échelle horizontale en milliers d'ohms, et une échelle verticale en milliers de millivolts pour créer la partie haute de votre graphique comme sur la fig. 11-3. Reportez les valeurs de la seconde colonne de votre tableau sur votre graphique pour tracer votre courbe.

Réalisez maintenant votre graphique du bas à partir des données de la troisième colonne de votre tableau.

Phase 4: le gain

Il faut maintenant comparer les pentes de vos deux courbes. Mais cela n'a de sens que si vos courbes sont pratiquement droites en vous rappelant que, sur la fig. 11-3, la courbe de sortie est aplatie à ses extrémités. Je m'intéresse donc à un segment de la partie centrale de la courbe. Il est très important de choisir le même écart pour les valeurs des résistances dans votre courbe d'entrée.

J'ai représenté sur la fig. 11-10 les segments que j'ai sélectionnés dans mes tracés. Vous constatez que pour chaque segment la résistance varie entre 2K25 et 3K25. Vous pouvez bien entendu choisir une plage de valeurs différente tant qu'elle est identique dans le tracé d'entrée et celui de sortie.

La pente (que j'appellerai S) d'une ligne droite peut être définie comme étant l'accroissement vertical (V) divisé par l'accroissement horizontal (H) :

$$S = (V / H)$$

Déterminez la pente de la courbe de la sortie (appelez-la S1), puis divisez-la par la pente de la courbe d'entrée (que vous appellerez S2) afin d'obtenir le gain de votre amplificateur opérationnel :

$$\text{Gain} = S1 / S2$$

Si vous calculez les deux pentes de vos courbes, et divisez celle de la sortie par celle de l'entrée, vous aurez la réponse. Mais l'accroissement horizontal étant identique dans chaque cas, cela s'annule. Ainsi, la formule simplifiée, où V1 est l'accroissement de votre tension de sortie sur le tracé, et V2 celui de votre tension d'entrée, devient :

$$\text{Gain} = V1 / V2$$

V1 et V2 étant évaluées avec les mêmes unités, cela est correct. (Rappelez-vous, j'ai insisté pour que vous reportiez vos valeurs en millivolts.)

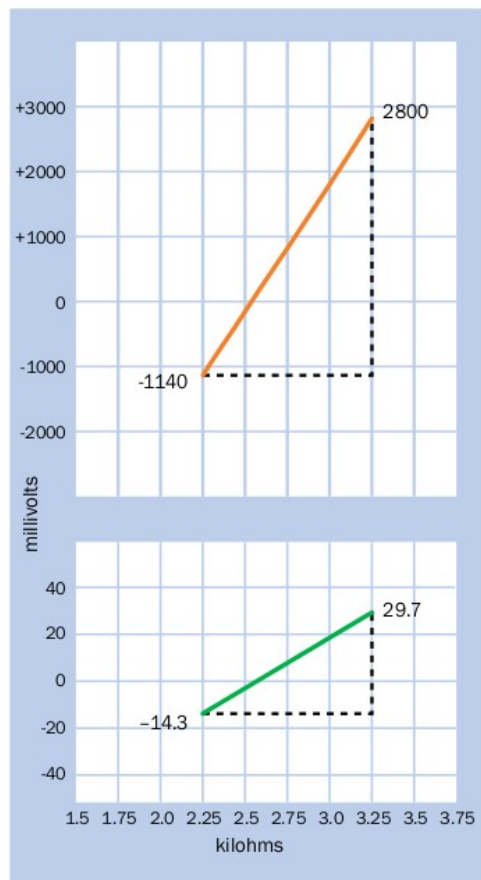


Figure 11-10 Gradients des tensions d'entrée et de sortie.

Sur la fig. 11-10, l'écart de tension V1 varie entre -1 140 et +2 800, c'est-à-dire entre « 1 140 millivolts sous la tension au point milieu » et « 2 800 millivolts au-dessus de cette même valeur ». L'accroissement total de V1 est donc de 2 800 + 1 140 soit 3 940 mV.

De même, l'accroissement de V2 est compris entre -14,3 mV et +29,7 mV, soit un total de 44 mV.

Je peux donc finalement calculer le gain !

$$\text{Gain} = 3\,940 / 44$$

On obtient à peu près 89,6. Arrondissons à 90, mes mesures n'étant pas suffisamment exactes pour justifier la présence d'un chiffre décimal. Quel résultat obtenez-vous avec vos valeurs ? Pensez-vous que c'est correct ?

Est-ce correct ?

Après une telle suite de calculs, je me demande toujours si j'ai commis une erreur. Je peux comparer le résultat avec ce que je sais que le gain devrait être. Rappelez-vous, si F est la valeur de la résistance de contre-réaction négative, et si G est la valeur de la résistance de retour à la masse (voir la fig. 11-4) alors :

$$\text{Gain} = 1 + (G / F)$$

La résistance G étant de 1M (1 000 000 ohms) et la résistance F de 10K (10 000 ohms), la valeur du gain théorique équivaut à 101:1.

Je pense que 90:1 est une valeur suffisamment proche étant donné les méthodes simplistes utilisées.

Domage que vous ne disposiez pas d'un générateur de signaux et d'un oscilloscope comme je l'évoquais au début. Mais même si c'était le cas et si vous travailliez dans un laboratoire d'électronique bien équipé, vous devriez tout de même effectuer des mesures, utiliser des formules mathématiques simples et faire en sorte de minimiser les inexactitudes. Ces procédures sont inévitables en sciences et en ingénierie. C'est pourquoi je les ai incluses ici.

Bien entendu, il est plus amusant d'assembler les composants entre eux et de découvrir comment l'ensemble fonctionne. Si vous préférez, allez-y, je n'ai pas d'objection à ce que vous ignoriez les sections du livre dans lesquelles des mesures sont prises et que vous puissiez ainsi avoir le plaisir de réaliser des circuits et les mettre sous tension.

Le seul ennui est que vous ne saurez pas *pourquoi* ils fonctionnent. Vous ne pourrez pas évaluer leurs performances ou créer vos propres circuits. Si vous voulez étudier sérieusement l'électronique, des mesures et des calculs simples sont nécessaires, particulièrement lorsque l'on travaille avec des signaux analogiques et leur amplification.

Réduire les écarts

Si vous vous inquiétez de savoir quelle est la cause principale des inexactitudes qui m'ont conduit à trouver un gain de 90:1 au lieu de 101:1 dans cette expérience, je parie que le diviseur de tension A est le coupable. La résistance G déterminait la tension au point milieu du diviseur A. Cette tension était probablement légèrement plus élevée que la moitié de la tension d'alimentation. Je n'en suis pas sûr mais la mesurer (à nouveau) provoquerait une légère variation.

La façon la plus évidente de réduire les inexactitudes serait d'utiliser une alimentation symétrique adaptée. Si vous consultez des schémas avec des amplificateurs opérationnels, vous constaterez que la plupart considèrent que vous utilisez ce type d'alimentation.

Sur la fig. 11-4, par exemple, le schéma qui a été tracé pour faciliter son montage sur une plaque d'essais peut être redessiné de manière plus conventionnelle comme sur la fig. 11-11.

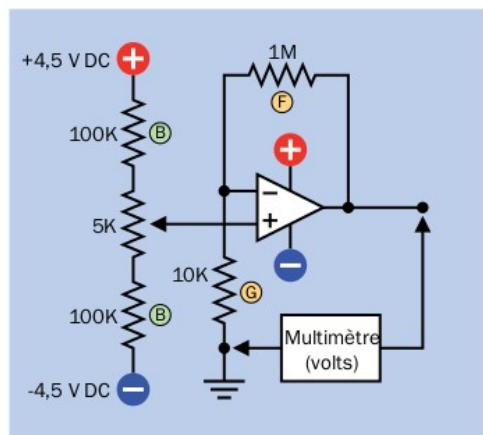


Figure 11-11. Le schéma précédent facilitait sa réalisation sur une plaque de montage et partait du principe qu'une seule pile de 9 V était utilisée pour l'alimentation. Ce schéma est redessiné ici dans un format plus conventionnel supposant l'utilisation d'une alimentation symétrique. Notez que le symbole de masse implique un potentiel de 0 V.

Le diviseur de tension B est toujours nécessaire pour appliquer une tension variable à l'entrée non inverseuse, mais, le diviseur A a disparu. À sa place, vous remarquez un symbole de masse. Il signifie que vous devez connecter cette partie du circuit au point neutre

de votre alimentation symétrique qui sera la tension de référence.

Cela peut porter à confusion car, dans de nombreux circuits utilisant une seule alimentation standard (pas un type symétrique), le symbole de masse identifie le pôle négatif de l'alimentation. La règle générale est que le symbole de masse reconnaît toujours le potentiel 0 volt.

C'est à peu près tout ce que je dirai sur la théorie des amplificateurs opérationnels. Je n'ai fait qu'effleurer le sujet, mais ce livre est avant tout un livre de mise en pratique. C'est la raison pour laquelle je n'ai pas démontré pourquoi le gain peut être calculé par la formule $1 + (F / G)$. Vous pouvez consulter à ce sujet d'autres livres traitant des amplificateurs opérationnels.

Si vous m'avez suivi pas à pas, vous savez maintenant comment un amplificateur opérationnel fonctionne, ce qui devrait faciliter votre compréhension d'autres ouvrages d'électronique.

Les circuits de base

Arrivé à ce point, je vais maintenant vous montrer ce que la plupart des livres d'électronique présentent au début, les deux circuits de base simplifiés les plus communs, utilisant des amplificateurs opérationnels. Je n'ai pas commencé mon exposé sur les amplificateurs opérationnels ainsi, car je préfère toujours entrer dans le vif du sujet par des expériences. Les circuits de base ne sont pas très utiles tant que vous ne connaissez pas les composants qui doivent leur être ajoutés pour les faire fonctionner.

Les deux circuits de base sont représentés ci-contre sur les fig. 11-12 et fig. 11-13. Sur la fig. 11-12 le signal d'entrée est directement appliqué à l'entrée non inverseuse. Cela correspond à la configuration que nous avons utilisée jusqu'à présent. La résistance de contre-réaction que j'ai appelée F, est habituellement identifiée déjà d'autres éléments dans ce livre, ce qui aurait créé une confusion. Vous devez maintenant savoir ce que signifie « résistance de contre-réaction » et résistance de « retour à la masse ». Le gain de notre amplificateur est donc devenu :

$$\text{Gain} = 1 + (R2 / R1)$$

Ce qui est identique à la formule $\text{Gain} = 1 + (F / G)$ utilisée précédemment.

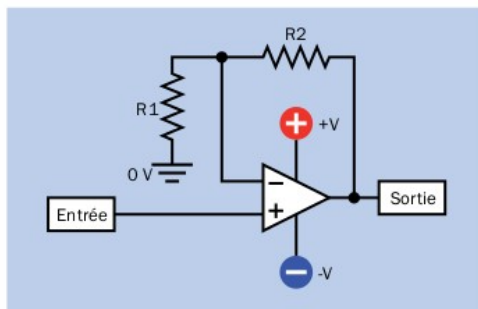


Figure 11-12 Représentation la plus simple possible d'un circuit avec amplificateur opérationnel dans lequel le signal est appliqué à l'entrée non inverseuse.

La fig. 11-13 présente une configuration différente dans laquelle le signal traverse la résistance R1 avant d'être appliqué à l'entrée inverseuse qu'il partage avec la résistance de contre-réaction R2.

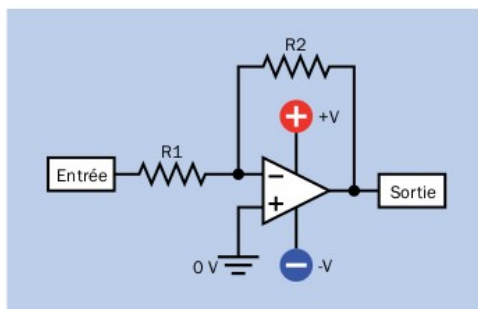


Figure 11-13 Représentation la plus simple possible d'un circuit avec amplificateur opérationnel dans lequel le signal est appliqué à l'entrée inverseuse.

L'entrée non inverseuse est reliée à la masse afin de recevoir la tension de référence. Comme précédemment, la valeur de R2 est relativement élevée par rapport à celle de R1, vous obtenez ainsi moins de contre-réaction négative et un gain plus élevé. En revanche, le signal de sortie est inversé, puisque le signal est appliqué à l'entrée inverseuse. Ainsi, une tension plus élevée à l'entrée inverseuse génère une sortie plus faible et vice versa. En conséquence, la formule de calcul du gain est précédée du signe moins :

$$\text{Gain} = -(R2 / R1)$$

Dans chacun de ces schémas, si R2 est omise, la résistance de contre-réaction négative devient pratiquement infinie, tout comme le gain, ce qui correspond au mode dans lequel vous avez utilisé l'ampli-op lors de la première expérience.

Sans contre-réaction négative, l'ampli-op sursait à la moindre variation de tension entre ses entrées.

Circuits de base sans alimentation symétrique

Les circuits de base supposent l'utilisation d'une alimentation symétrique. Certains ouvrages suggèrent de créer ces circuits en utilisant une paire de piles de 9 V. Ce principe est illustré sur la fig. 11-14. Vous connectez le pôle positif d'une pile au pôle négatif de l'autre et ce point devient le potentiel théorique neutre de la masse. Les autres pôles des piles délivrent une alimentation de 9 V positive et l'autre négative.

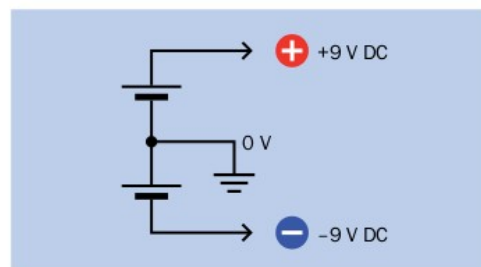


Figure 11-14 Deux piles de 9V peuvent être utilisées pour créer une alimentation symétrique bien que cette solution présente des inconvénients.

Cela semble simple, alors pourquoi ne l'ai-je pas suggéré dès le début ? Il existe plusieurs raisons à cela.

1. L'utilisation des diviseurs de tension pour créer une tension intermédiaire vous a permis d'apprendre un concept intéressant.
2. Pour de nombreuses raisons, vous préférez sans doute utiliser un adaptateur secteur et je ne pense pas qu'il eût été raisonnable de vous demander d'en utiliser deux.
3. Les piles ne peuvent pas être appairées entre elles et ainsi la tension au point milieu ne serait pas exactement 0V.

- La création d'une tension de référence de 0 V demande l'ajout d'une autre ligne d'alimentation à votre plaque de montage ce qui mène à la confusion. Par ailleurs, sa représentation est plus difficile dans un schéma adapté à la réalisation sur une platine de montage.
- Ne pensez pas obtenir réellement une meilleure performance en utilisant deux piles de cette façon. Les piles souffrent de variations de leurs tensions selon leur âge et selon le courant qu'elles doivent fournir.

Dans tous les cas, quelques solutions alternatives, qui suppriment le casse-tête de l'appariage des résistances A et B, ont permis de réduire ce besoin généralisé d'alimentations symétriques.

Ainsi, la fig. 11-15 propose une version différente du schéma de la fig. 11-12, sans alimentation symétrique, convenant à un signal audionumérique.

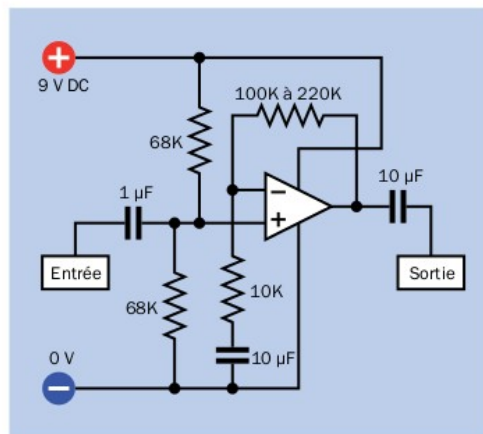


Figure 11-15. Amplificateur opérationnel configuré pour l'amplification de signaux audio, n'utilisant qu'une seule alimentation, avec le signal d'entrée appliqué à l'entrée non inverseuse.

Deux résistances de 68K constituent le seul diviseur de tension nécessaire générant la tension de référence, et les résistances n'ont pas besoin d'être appariées pré-

ciemment. L'entrée peut être relative à n'importe quel potentiel, en raison de la présence d'un condensateur de liaison à l'entrée qui isole le circuit de la composante continue du signal d'entrée. De façon similaire, un condensateur de liaison de 10 µF placé en sortie isole celle-ci de tout autre composant placé à la suite.

La résistance de retour à la masse de 10K qui devrait être reliée au point neutre de l'alimentation symétrique constitue le seul problème subsistant, mais le condensateur de 10 µF l'isole, rendant le point neutre de masse inutile.

L'utilisation d'une résistance de contre-réaction de 100K à 220K en association avec la résistance de retour à la masse de 10K permet d'obtenir un gain compris entre 11:1 et 23:1. L'amplification la plus faible convient pour quelqu'un parlant très près du microphone alors que le gain plus élevé est plus approprié à la surveillance du bruit ambiant dans une pièce.

Le schéma de la fig. 11-16 met en œuvre les mêmes compromis, mais cette fois avec amplification depuis l'entrée inverseuse. Comparez-le avec la version théorique de la fig. 11-13.

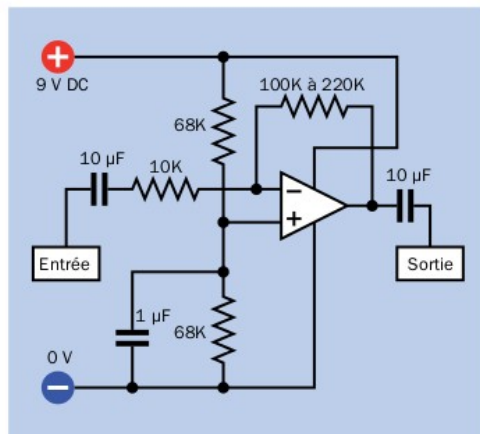


Figure 11-16. Amplificateur opérationnel configuré pour l'amplification de signaux audio, n'utilisant qu'une seule alimentation, avec le signal d'entrée appliqué à l'entrée inverseuse.

En bref : les amplificateurs opérationnels

Il est temps de résumer : si besoin, vous pourrez ainsi revenir à cette section et rafraîchir votre mémoire sur certains concepts délicats.

- Un amplificateur opérationnel est similaire à un comparateur. Ils ont tous deux le même symbole schématique. Ils ont également chacun deux entrées et comparent les tensions de leurs entrées pour produire un signal de sortie.
- Une des entrées est non inverseuse alors que l'autre est inverseuse.
- Les comparateurs et les amplificateurs opérationnels utilisent tous les deux une contre-réaction pour modifier l'une de leurs entrées. Cependant, un comparateur a recours à une contre-réaction positive pour créer une sortie haute ou basse sans compromis intermédiaire. Un amplificateur opérationnel préfère la contre-réaction négative pour que sa sortie soit une copie fidèle de son entrée.
- La contre-réaction négative est toujours appliquée à l'entrée inverseuse.
- La contre-réaction positive permet à un comparateur d'ignorer les faibles variations de son entrée. Cela s'appelle l'hystérésis. Dans les amplificateurs opérationnels, l'hystérésis est au contraire indésirable, les amplis-op devant amplifier (et non ignorer) la moindre petite variation de leur signal d'entrée.

- Les amplificateurs opérationnels sont principalement utilisés pour l'amplification des signaux alternatifs, tels que les signaux audiophoniques. Les comparateurs, quant à eux, utilisent, généralement, des signaux continus.
- Le signal d'entrée d'un ampli-op peut, indifféremment, être appliqué à son entrée non inverseuse comme à son entrée inverseuse. L'amplificateur opérationnel amplifie la différence dans les deux cas. Cependant, si vous appliquez le signal à l'entrée inverseuse, le signal de sortie sera inversé (d'où l'appellation d'entrée « inverseuse »).
- La tension appliquée à l'entrée non utilisée par le signal doit être contrôlée et sera le potentiel de référence.
- La sortie d'un comparateur nécessite en général une résistance de rappel et peut être compatible avec les circuits-intégrés logiques. La sortie d'un ampli-op n'est normalement pas compatible avec l'entrée d'un circuit logique car il s'agit d'un signal analogique comportant de très faibles variations.
- Un comparateur requiert habituellement une résistance de rappel pour produire un signal de sortie. De façon courante, un ampli-op génère son propre signal de sortie.

Maintenant que nous avons parcouru l'ensemble de la théorie des amplificateurs opérationnels, il est temps de mettre cela en pratique en construisant un amplificateur audiophonique.

Un amplificateur fonctionnel

Dans l'expérience 10, vous avez découvert qu'un LM741 n'était pas approprié pour piloter un haut-parleur, même par l'intermédiaire d'un transistor 2N2222. Le LM741 est prévu pour être le composant de base à la réalisation de préamplificateurs qui accroissent la tension de très faibles signaux d'entrée mais ne peuvent pas délivrer une puissance importante. On utilise souvent l'abréviation « préampli » pour faire référence aux préamplificateurs.

Les préamplificateurs étaient préalablement disponibles sous forme d'appareils autonomes, utilisés pour amplifier les entrées d'un magnétophone, d'un microphone ou d'une cellule de platine vinyle. Ils comportaient des réglages pour le volume, les basses et les aigus et transmettaient leur signal à un amplificateur de puissance conçu pour la connexion de haut-parleurs. De nos jours, préampli et amplificateur de puissance sont en général associés dans un même appareil, un récepteur stéréophonique ou un système audiophonique intégré. Pour notre sujet, le LM741 est l'équivalent d'un préamplificateur, nous avons donc besoin d'un amplificateur de puissance.

Ce peut être un autre composant de base, le circuit intégré LM386. Il a un format identique à celui d'un ampli-op avec deux entrées mais il est prévu pour délivrer une puissance d'environ 300 mW à un petit haut-parleur. Cela paraît timide, comparé à la puissance que vous pouvez trouver dans un système audio moderne, mais, en réalité, 300 mW suffisent dans de nombreux cas.

Le circuit intégré 386

Le brochage du LM386 est indiqué sur la fig. 12-1. Il est similaire à celui du LM741 mais pas identique, soyez prudent lorsque vous connectez l'alimentation et sa sortie.

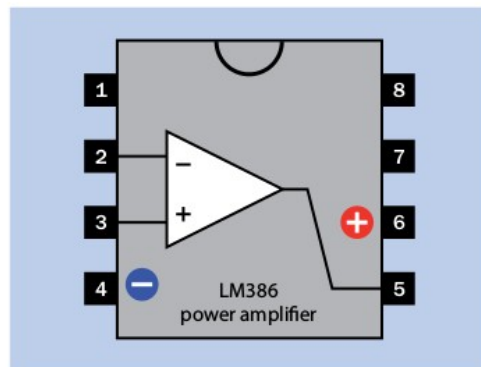


Figure 12-1. Vue interne d'un circuit intégré amplificateur LM386. Les broches 1 et 8 sont réservées pour relier un condensateur externe pouvant augmenter le gain du circuit de sa valeur par défaut 20:1 jusqu'à 200:1.

Les broches 1, 7 et 8 sont représentées sans connexion. Elles peuvent être utilisées conjointement avec des composants externes si vous souhaitez augmenter le gain de l'amplificateur de 20:1 (son gain par défaut) jusqu'à 200:1. Une telle modification engendrera de fortes distorsions mais, si vous voulez essayer, ajoutez un condensateur de 10 μF aux broches 1 et 8 et un condensateur de 0,1 μF entre la broche 7 et la masse. Cette configuration présente l'avantage de diminuer la tendance du LM386 à osciller ou produire des bruits parasites. Si un gain de 200:1 est trop élevé pour vous, placez une résistance de 1K ou plus en série avec le condensateur de 10 μF entre les broches 1 et 8.

Le circuit amplificateur

Si vous consultez le schéma sur la fig. 12-2, plusieurs aspects devraient vous paraître familiers. Vous avez déjà étudié la section traitant du microphone. Sa sortie modifie la tension moyenne créée par les deux résistances de 68K formant un diviseur de tension. Les variations de tension sont ensuite appliquées à l'entrée non inverseuse du LM741.

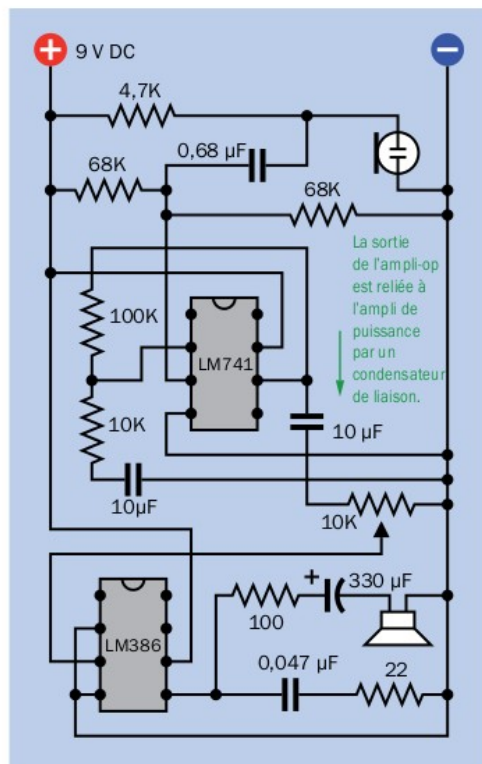


Figure 12-2. Amplificateur audiophonique complet avec microphone et haut-parleur. L'étage préamplificateur utilise un LM741 suivi par un LM386 en amplification de puissance.

La contre-réaction issue de la broche 6 du LM741 retourne à l'entrée inverseuse via la résistance de 100K, après avoir été atténuée par la résistance de retour à la masse de 10K. Le condensateur de 10 µF connecté entre cette résistance et la masse de l'alimentation permet à l'entrée inverseuse du LM741 d'être flottante

vis-à-vis de l'alimentation, rendant ainsi inutile la présence d'un diviseur de tension relié à cette entrée. (Si cela reste flou pour vous, je vous conseille de relire les explications techniques au début de l'expérience 11 pour comprendre ce que cela signifie.)

La sortie du LM741 est reliée à un potentiomètre de 10K permettant le réglage du volume du LM786 au travers d'un condensateur de liaison de 10 µF.

Le curseur de ce potentiomètre est relié à la broche 3 du LM386, son entrée non inverseuse. La broche 2, son entrée inverseuse est reliée à la masse de l'alimentation. Le LM386 amplifie les variations entre ses deux entrées, exactement comme le LM741 mais sa sortie est assez puissante pour piloter un petit haut-parleur. Remarquez le condensateur de valeur élevée de 330 µF et la résistance de 100 Ω en série avec le haut-parleur.

Ce circuit est un compromis entre gain et distorsion.

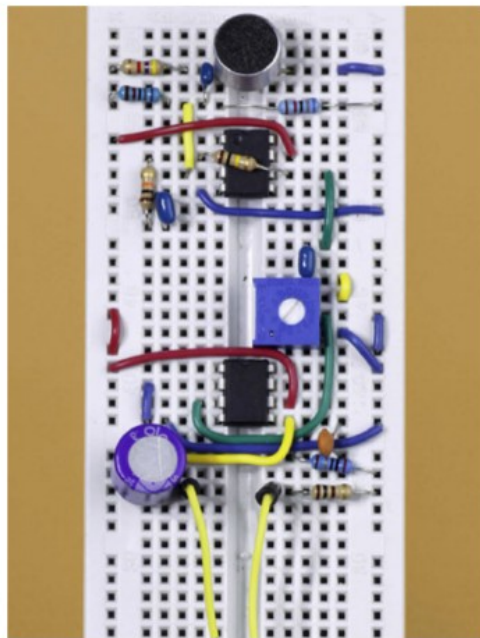


Figure 12-3. Vue de la réalisation sur une plaque de montage du circuit utilisant un amplificateur LM386. Les fils jaunes, en bas de la figure, sont reliés à un haut-parleur, non représenté. Le circuit peut fonctionner pendant un temps limité avec une pile de 9V.

Si vous remplacez la résistance de 100 Ω par une valeur moindre, votre voix sera plus puissante mais plus déformée. Vous pouvez essayer plusieurs valeurs de cette résistance avec différents haut-parleurs et selon le réglage du gain par le potentiomètre.

Le montage du circuit de la fig. 12-2 réalisé sur une platine est représenté sur la fig. 12-3.

Recherche de dysfonctionnement

Voici quelques pistes pour expliquer les raisons d'un mauvais fonctionnement de l'amplificateur.

Bruit

Si vous entendez des sifflements, des bourdonnements ou des oscillations périodiques en mettant le circuit sous tension, cela pourrait être dû à plusieurs causes.

- Mauvais câblage. Si vous utilisez des fils de liaison avec des picots de connexions, leur enchevêtrement risque de capter des bruits électriques. Ce circuit doit être réalisé à l'aide de fils coupés à la bonne dimension placés bien à plat contre la platine de montage. Il est nécessaire de rapprocher les composants au maximum.
- Retour acoustique (effet Larsen). Essayez d'éloigner le haut-parleur du microphone.
- Ajoutez les composants décrits précédemment aux broches 1, 7 et 8 du LM386. La mise à la masse de la broche 7 à travers un condensateur de 0,1 μF peut supprimer les bruits parasites si vous intégrez parallèlement le condensateur et la résistance optionnels reliant les broches 1 et 8.
- Augmentez la valeur du condensateur de 0,047 μF à 0,1 μF .
- Si vous utilisez une alimentation de laboratoire au lieu d'une pile, elle pourrait provoquer du ronflement ou des bourdonnements sur le son produit. Intégrez un condensateur de la plus forte valeur que vous ayez trouvé, entre les deux pôles de l'alimentation

au niveau de la plaque de montage. J'ai moi-même à disposition une alimentation de bonne qualité, mais j'ai remarqué qu'un condensateur de 4 700 μF réduisait certains bruits de fond.

Distorsion

S'agissant d'un circuit extrêmement simple, la distorsion est inévitable. Vous pouvez toutefois tenter ces options.

- Substituez la résistance de 3K3 par une de 4K7 en série avec le microphone électret.
- Ajoutez une résistance de 10K en série entre le curseur du potentiomètre de 10K et l'entrée du LM386, broche 3.

Son faible

Vous n'obtiendrez pas un volume important en sortie de ce petit montage, voici, cependant, deux modifications possibles pour l'améliorer.

- Les résistances reliées au LM741 définissent un gain de $1 + (100 / 10) = 11:1$ pour l'étage préamplificateur. Essayez de remplacer la résistance de 100K par une de 150K, cela augmentera le gain à 16:1. Vous pouvez aussi réduire la valeur de la résistance de retour à la masse de 10K.
- Augmentez le volume perçu en plaçant le haut-parleur dans un petit coffret clos ou dans un tube. J'ai constaté qu'un tube en plastique de diamètre de 5 cm et de 15 cm de long était un bon réceptacle pour un haut-parleur de 5 cm de diamètre.
- J'ai obtenu de bons résultats en reliant la sortie du LM386 et la masse au connecteur d'entrée d'un haut-parleur multimédia pour ordinateur (qui contient son propre amplificateur). Essayez cela à vos propres risques ! Le condensateur de 330 μF devrait protéger votre haut-parleur, mais si vous faites une erreur de câblage, les conséquences ne sont pas prévisibles.

Le projet dominant de cette série dédiée à la reproduction sonore est un montage qui revient sur le concept de l'utilisation d'un son pour commander la commutation marche/arrêt d'un appareil. Je vous ai montré comment le réaliser dans l'expérience 10, je vais maintenant y revenir plus largement. Ce projet est inspiré de l'histoire d'un des pionniers des circuits intégrés analogiques.

Fondamentaux : l'histoire de Widlar

Un ingénieur légendaire, nommé Bob Widlar, a effectué de nombreux travaux de recherche sur les amplificateurs opérationnels au cours du premier boom des semi-conducteurs, dans les années 1960. Il était alors une figure marquante de l'époque où sont nées les premières sociétés de la Silicon Valley, comme Fairchild et National Semiconductor. Célèbre à la fois pour ses travaux de développement et son humeur exécrable, il a été confronté sa vie durant à l'alcoolisme et était décrit par ses collègues comme paranoïaque, introverti et peu sociable. Mais en ce temps-là, une telle personnalité irritante et instable était tolérée dans la Silicon Valley, car l'électronique était un domaine non conformiste dans lequel les départements des ressources humaines avaient peu de contrôle sur les recrutements.

Widlar était tellement intolérant vis-à-vis des circuits défectueux et des dysfonctionnements des prototypes, qu'il avait pour habitude de les détruire à l'aide d'un marteau-pilon. On appelait cela la « Widlarisation ». Il ne supportait pas non plus le bruit et avait installé dans son bureau un système qui émettait un sifflement strident si un visiteur élevait un peu trop la voix et lui criait dessus. Un ingénieur de chez Fairchild m'a raconté

que ce gadget était connu dans la société sous le nom de « l'enquêteur » !

Je le renommerai le « contestataire de bruit » et vous expliquerai comment réaliser votre propre version. Comme Widlar a fondé sa réputation sur la conception des amplificateurs opérationnels, il me paraît approprié que ce projet soit élaboré autour d'un amplificateur opérationnel.

Pas à pas

Je vais développer la manière de concevoir et réaliser ce circuit par étapes pour vous donner une idée des procédures à suivre.

L'idée d'élaborer des circuits peut vous intimider. Par où commencer ? Mais comme un circuit peut être divisé en sections que vous assemblerez de façon fiable, puis que vous testerez une par une, la démarche de création ne doit pas être si compliquée que cela.

Bien entendu, il se pourrait que la première tentative de réalisation d'un prototype ne soit pas totalement satisfaisante. Mais on peut s'y attendre, s'agissant d'un prototype.

La première étape consiste à réfléchir aux fonctions du circuit et dresser une liste des composants à même de le réaliser. Pour le contestataire de bruit, ma liste est la suivante.

1. Un composant capable de détecter un bruit et de le convertir en un signal électrique. Ça serait un microphone électret.
2. Un préamplificateur pour le signal. C'est un amplificateur opérationnel LM741.
3. Un amplificateur de courant. Nous pouvons utiliser le même transistor 2N2222 que précédemment.

4. Quand la tension ou l'intensité dépasse une valeur limite réglable, il doit déclencher un dispositif, sans savoir encore lequel.
5. Le dispositif envisagé doit émettre un bruit en signe de protestation. Il s'agit de la « sortie protestataire ». Je choisis un temporisateur 555 en mode astable à une fréquence audible.

Détection

Vous trouverez la clé du fonctionnement de l'ensemble à l'étape 4 précédente. Comment pouvons-nous y parvenir ?

Réfléchissons au fonctionnement d'un timer 555 lorsqu'il opère en mode astable. Sitôt alimenté, il démarre de lui-même, et s'arrête quand son alimentation est interrompue. Mais ce n'est pas tout, il est aussi muni d'une broche de réinitialisation. Quand un niveau positif est appliqué à cette entrée, le timer fonctionne. Si c'est une tension nulle, le timer s'arrête. Ainsi, je peux peut-être convertir la sortie de l'ampli-*op* de façon à l'appliquer à la broche de réinitialisation. Cela semble plausible.

- Quand le microphone électret ne détecte aucun bruit, un signal bas appliqué à l'entrée de réinitialisation empêchera le timer de générer sa sortie protestataire.
- Lorsque le microphone entend quelqu'un crier, la sortie de l'ampli-op devient positive. En l'appliquant à la broche de réinitialisation, elle permet au timer de produire son signal de protestation.

Le seul problème est que le signal à la sortie de l'amplificateur opérationnel est un signal pulsé. Qu'en est-il si je le transmets à travers un condensateur de liaison, ramenant le signal au niveau de la masse, de sorte que la sortie ne varie que par rapport à la masse comme dans l'expérience 10 ? Je peux alors ajouter un condensateur de filtrage afin de lisser les pics du signal, au moins partiellement.

Si vous avez lu *L'Électronique en pratique*, vous savez qu'un condensateur de filtrage est généralement placé entre le signal et la masse, dans le but d'en atténuer les pics et les creux. Le signal résultant devrait être suffisamment propre pour pouvoir attaquer la broche de réinitialisation du temporisateur.

Prenons quelques instants pour consulter la fiche technique du 555. Elle précise que l'entrée de réinitialisation

stoppe le timer quand son niveau est inférieur ou égal à 1 V. Dans le cas contraire, celui-ci fonctionne.

Par conséquent, si je peux faire en sorte que la sortie de l'ampli-op soit supérieure à 1 V quand quelqu'un crie, mais inférieure sinon, le temporisateur réagira comme nous le souhaitons.

Cela fonctionnera-t-il?

À ce stade, je pourrai utiliser un logiciel de simulation, par exemple SPICE, pour simuler le fonctionnement de mon circuit, en montrant les interactions entre ses composants. Mais comme j'ai recours à des signaux analogiques très instables, le mieux est d'assembler les composants entre eux pour vérifier s'ils se comportent effectivement comme je l'espère.

La première partie du circuit contestataire de bruit est représentée sur la fig. 13-1. Il est très similaire à la moitié supérieure du circuit de l'expérience 12 de la fig. 12-2.

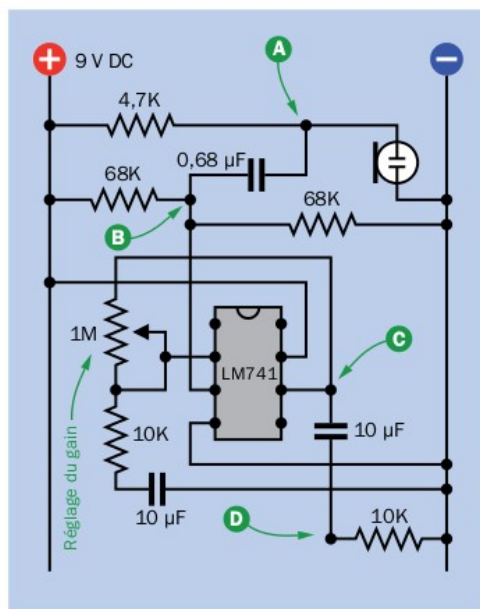


Figure 13-1. Première étape de la construction du circuit « contestataire de bruit ».

La principale différence est le remplacement de la résistance de contre-réaction négative par un poten-

tiomètre de 1M permettant le réglage de la sensibilité. Une résistance de 10K a été ajoutée sous le condensateur de liaison, entre la sortie et la masse afin de ramener les signaux à la masse. À l'étape suivante, nous allons vérifier ce qui se passe réellement dans le circuit. À nouveau, un oscilloscope serait utile, mais comme vous n'en possédez probablement pas, je ne vais pas en utiliser non plus.

Assemblez le circuit et assurez-vous que le potentiomètre de 1M présente une résistance maximale entre la sortie de l'ampli-op et l'entrée non inverseuse, afin de minimiser la contre-réaction négative pour obtenir le gain maximal.

Faites maintenant le « Aaah » de test habituel ou sifflez devant le microphone tout en contrôlant les tensions aux points A, B, C et D du circuit, votre fil de mesure rouge touchant successivement les endroits indiqués par les flèches, et en reliant le fil noir à la masse. Vous devriez relever des tensions voisines de celles indiquées sur la fig. 13-2. (Vous vous demandez sûrement pourquoi la table indique un point E, alors qu'il n'existe pas sur la fig. 13-1. Il y aura un point E dans l'extension à venir de ce circuit.)

Endroits mesurés	Sans bruit d'entrée		Avec un bruit à l'entrée	
	AC	DC	AC	DC
A	0 mV	7,5 V	30 mV	7,5 V
B	0 mV	4,5 V	30 mV	4,5 V
C	0 V	4,5 V	2 V	4,5 V
D	0 V	0 V	2,5 V	0 V
E	0 V	0 V	0 V	3,0 V

Figure 13-2. Tensions relevées aux points du circuit, montrant comment un très petit signal alternatif est amplifié puis converti en une sortie continue utilisable.

Il est possible que vos relevés ne soient pas exactement identiques aux miens, et ce pour plusieurs raisons. Votre son « Aaah » n'était peut-être pas aussi fort que le mien (ou au contraire plus fort). Votre microphone peut être plus ou moins sensible que le mien, ou encore votre multimètre peut nécessiter plus de temps pour stabiliser ses mesures ou évaluer les tensions alternatives différemment. Quoi qu'il en soit, de petits écarts sont sans importance.

Au début, le microphone génère une tension alternative d'environ 30 mV au point A lorsque vous parlez

fortement. S'agissant d'une valeur alternative, elle reste identique à l'autre extrémité du condensateur, au point B. En revanche, la composante continue s'est élevée à 4,5 V par le diviseur de tension. En poursuivant en bas du schéma, la sortie du LM741 est amplifiée pour atteindre approximativement 2,5 V alternatifs, lorsque le microphone détecte un bruit. La composante continue de 4,5 V est toujours présente au point C, mais le condensateur de liaison bloque le courant continu et nous ne relevons qu'une tension alternative variant entre 0 V et 2,5 V au point D lorsque que vous générez du bruit. Jusque-là, tout va bien. Une valeur variant de 0 V à 2,5 V paraît correcte.

Découvrons maintenant la version suivante du schéma sur la fig. 13-3.

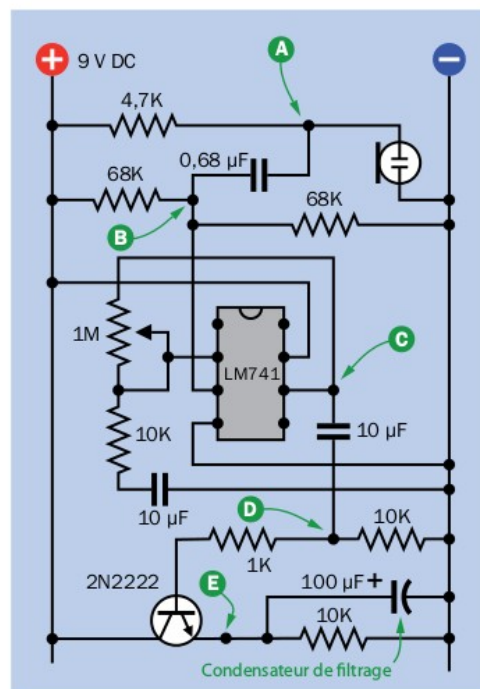


Figure 13-3. Seconde étape de la réalisation du « contestataire de bruit ».

J'ai ajouté un transistor qui apporte une puissance plus importante ainsi qu'un condensateur de filtrage de 100 µF. Pourquoi 100 µF ? L'expérience montre que

cette valeur est à peu près correcte pour les fréquences audibles. Il faut toutefois s'en assurer et, le cas échéant, modifier cette valeur.

Dans le circuit de la fig. 13-3, le transistor permet au courant d'atteindre la point E à travers une résistance très faible lorsqu'il est « conducteur ». En revanche, quand le transistor est bloqué, sa résistance apparente devient très élevée par rapport à la résistance de 10K, la tension au point E devient nulle.

Il s'agit d'une configuration en *collecteur commun* également nommée *émetteur suiveur* car la tension de son émetteur suit la tension de sa base (avec toutefois une légère diminution imposée par le transistor). Mais bien entendu, le transistor amplifie également le courant.

Si vous transposez le transistor et la résistance de 10K, l'effet est inversé, comme illustré sur la fig. 13-4. Ainsi, un transistor peut soit transmettre une variation de tension ou l'inverser, selon la configuration.

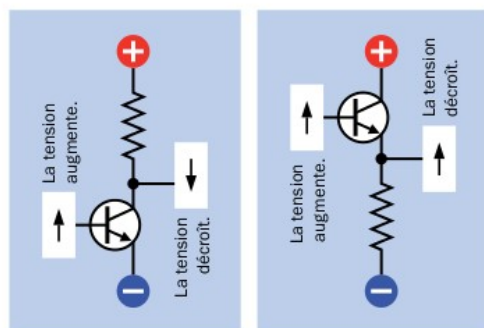


Figure 13-4. Selon que vous placez la résistance de charge à l'émetteur ou au collecteur d'un transistor, vous obtenez une tension de sortie passant du niveau bas au niveau haut ou l'inverse quand la tension de base varie du niveau bas au niveau haut.

Je prends un instant pour ouvrir une parenthèse à ce sujet car cette technique présente énormément d'applications.

Fondamentaux : translation de tension

Si vous le souhaitez, vous pouvez aisément réaliser l'expérience, avec seulement un transistor et deux résistances.

La fig. 13-5 affiche les valeurs relevées au multimètre obtenues en mesurant la sortie collecteur du transistor 2N2222. Sur chaque schéma, la valeur de la résistance

de base est de 1K, elle est d'abord reliée à la masse, puis au pôle positif de l'alimentation. En alimentant la base, le transistor passe de l'état « bloqué » à l'état « passant ». Le transistor est représenté en gris lorsqu'il est bloqué.

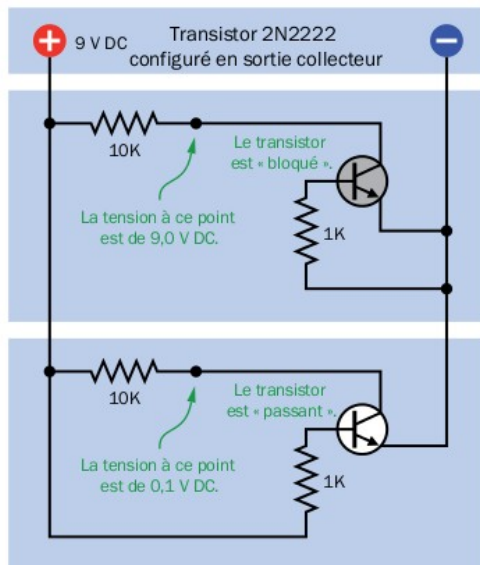


Figure 13-5. Mesures obtenues avec un transistor configuré pour délivrer un signal de sortie par le collecteur. Toutes les valeurs sont arrondies à une décimale près.

Les valeurs mesurées sont arrondies à une décimale, ainsi la valeur la plus haute atteinte par la sortie avec une alimentation de 9V DC sera légèrement inférieure à 9V DC.

Lorsque vous chargez un transistor par son collecteur, vous inversez son signal d'entrée.

Gardez à l'esprit les points suivants.

- Le résultat dépend du composant relié à la sortie du circuit. Les valeurs ont été relevées à l'aide d'un multimètre qui présente une très forte impédance d'entrée. Si vous utilisez un appareil de mesure différent, les valeurs pourraient être différentes. Néanmoins, beaucoup de composants, dont les amplificateurs opérationnels, les comparateurs et de nombreux circuits intégrés logiques, ont également une forte impédance d'entrée.

- Les valeurs sont obtenues avec un transistor fonctionnant en mode saturé. Si le courant traversant sa base est plus faible, sa sortie sera différente.
- Un soin particulier doit être apporté au transistor afin de ne pas dépasser le courant maximal qui peut le traverser. Vérifiez sa fiche technique pour vous en assurer !

Examinons maintenant la fig. 13-6. J'ai inversé la position de la résistance de 10K par rapport au transistor en la reliant à son émetteur. Dans la configuration émetteur-suiveur, le transistor n'inverse plus la tension. La tension de sortie suit la polarité de l'entrée. En revanche, l'excursion de la tension de sortie n'est pas aussi grande. À nouveau, les valeurs sont arrondies à une décimale près.

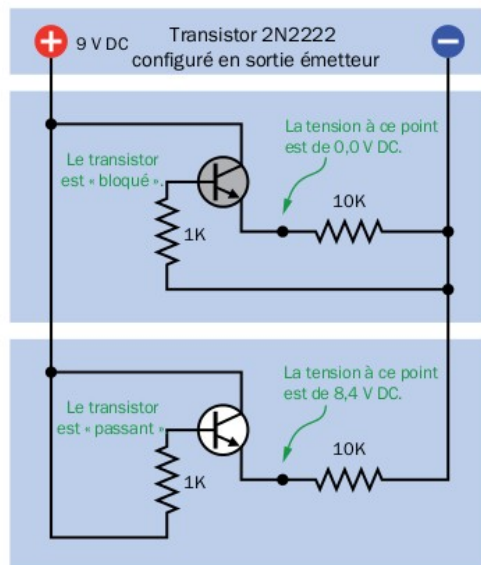


Figure 13-6. Valeurs relevées avec un transistor configuré pour délivrer un signal de sortie par l'émetteur.

Vous pouvez également ajuster les tensions dans chacun des cas en ajoutant une résistance à l'autre extrémité du transistor. Les résistances (vous l'avez deviné) constituent à nouveau un diviseur de tension.

Naturellement, dans chaque cas, le transistor fonctionnera en amplificateur de courant.

Suite du contestataire de bruit

Le circuit complet de notre « contestataire de bruit » est représenté sur la fig. 13-7, et la photo de sa réalisation sur une plaque de montage sur la fig. 13-8, page suivante.

Dans le cas où les concepts de base ne seraient pas clairs, vous trouverez un organigramme reprenant la logique de fonctionnement sur la fig. 13-9, page 101.

Vous devriez terminer votre version du circuit et vérifier s'il fonctionne. Une fois de plus, évitez d'utiliser les fils de liaison munis de plots à chaque extrémité. Ils créeront un enchevêtrement de fils qui vont électro-magnétiquement se perturber les uns les autres, entraînant du bruit et un fonctionnement erratique général. Les circuits avec amplificateurs opérationnels doivent toujours être réalisés en utilisant des fils les plus courts possible et en réunissant les composants entre eux au maximum.

Contrôlez dans un premier temps les tensions d'entrée et sortie de l'ampli-op et comparez-les avec la table présente sur la fig. 13-2. Si elles sont similaires, assurez-vous ensuite que le 555 est correctement câblé. Supprimez la connexion de sa broche 4, un bruit désagréable apparaît, un sifflement très aigu dans le haut-parleur. C'est la sortie « contestataire » du 555. Si vous n'entendez rien, cherchez et corrigez vos erreurs de câblage avant de continuer.

Si vous reconnectez la broche 4, le sifflement devrait disparaître, toutefois avec un léger délai, le temps que le condensateur de 100 μ F se décharge. Ajustez le potentiomètre de 1M au maximum de sa valeur et parlez devant le microphone. Il peut à nouveau y avoir un délai dû au chargement du condensateur, puis le timer commence à émettre son sifflement, jusqu'à ce que vous cessiez de parler fort.

C'est ainsi que le circuit doit se comporter. En fait, le mien fonctionne, mais uniquement en utilisant une bonne alimentation sur le secteur. Si je la remplace par une pile de 9 V, le comportement du circuit devient erratique.

C'est très dérangeant, mais comme je l'ai dit précédemment, la première version d'un prototype ne réagit pas toujours correctement.

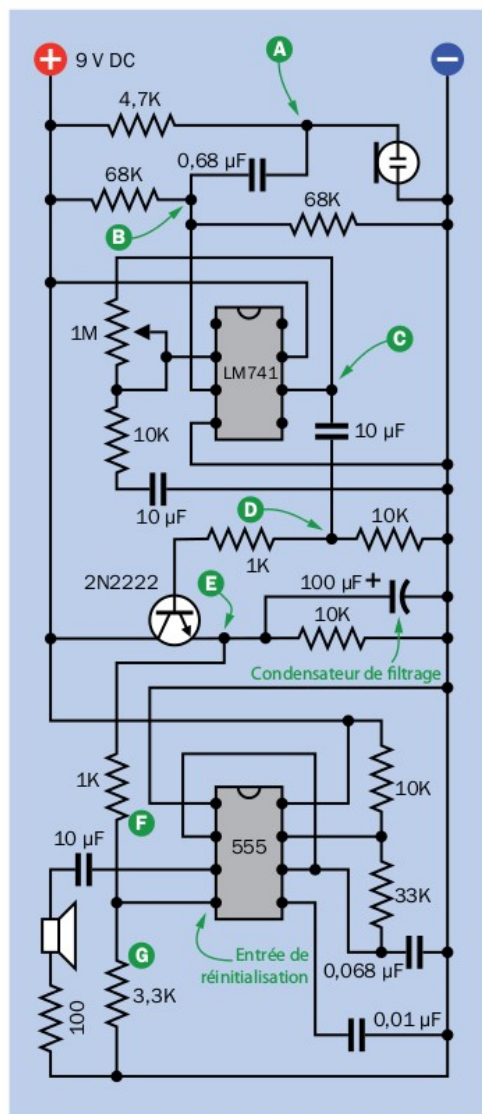


Figure 13-7. Schéma initial, complet, de l'appareil « contestataire de bruit ».

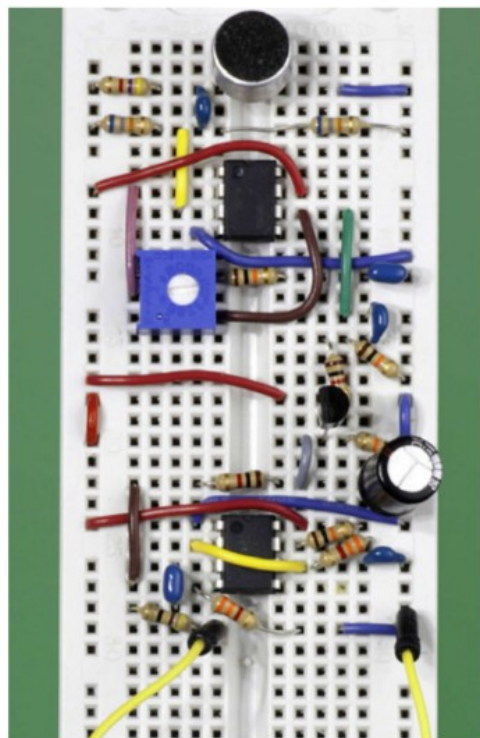


Figure 13-8. La version montée du circuit de l'appareil « contestataire de bruit » est prévue pour fonctionner avec une pile de 9 VDC. Les fils jaunes en bas de la photo sont reliés à un haut-parleur (non représenté).



Figure 13-9. Organigramme exposant comment chaque partie du « contestataire de bruit » communique avec la suivante.

Il s'agit donc de trouver la cause du problème. En vérifiant avec mon multimètre, la réponse paraît alors évidente : la tension au point E était correcte aussi longtemps que le point E n'était relié à rien d'autre que mon multimètre. Aussitôt que je reliais le point E à l'entrée de réinitialisation du timer 555, tout changeait.

La fiche technique du 555 ne m'a pas éclairé. Je supposais que la broche de réinitialisation possédait une forte impédance d'entrée, identique à celle d'une entrée de circuit intégré logique, mais apparemment ce n'est pas le cas. Je pense donc que le condensateur de filtrage de 100 μF n'est pas adéquat. Il laisse passer des creux et des pics de tension suffisants pour élever le niveau de la broche de réinitialisation du timer. Cela permet au 555 de continuer à émettre un sifflement même si le microphone ne détecte qu'un faible bruit.

Dans tous les cas, la sortie du transistor devient incompatible avec le temporisateur. Que faire ? Dans cette situation, il existe deux solutions.

- Bricoler le circuit pour tenter de le faire fonctionner.
- Essayer quelque chose de complètement différent.

La première option paraît toujours être plus rapide que de repartir de zéro. Ce n'est, bien entendu, pas toujours le cas mais je l'ai tentée malgré tout. J'ai ajusté la tension appliquée à la broche de réinitialisation en utilisant un diviseur de tension supplémentaire. Ses résistances sont identifiées F et G dans le schéma. Je n'ai pas déterminé la valeur de ces résistances en les calculant, j'ai essayé plusieurs valeurs empiriquement.

Cela a certes amélioré la situation mais le succès n'est pas garanti à toute épreuve. J'ai parfois entendu des claquements ou une série rapide de bips dans le haut-parleur, ce qui m'a fait penser qu'il était modulé par des ondulations du signal provenant du transistor. J'ai alors remplacé le condensateur de 100 μF par un 330 μF mais cela a juste créé de nouvelles oscillations. J'ai également essayé un condensateur de 47 μF . Vous pouvez expérimenter vous-même ces valeurs pour tenter d'améliorer le fonctionnement de votre circuit.

Question de puissance

Il est toujours désagréable qu'un circuit ne fonctionne pas mais, comme toujours, vous devez être méthodique dans la recherche d'une solution.

Je suppose que vous alimentez votre circuit avec une pile 9 V. Déconnectez à nouveau la broche 4 du timer 555 afin que le haut-parleur commence à diffuser son sifflement désagréable. Reliez le fil noir de votre multimètre à la masse de votre plaque de montage et le fil rouge au point B où les deux résistances de 68K sont reliées. Rappelez-vous, c'est ici que le circuit génère la tension de référence que l'ampli-op compare au signal issu du microphone. Réglez votre multimètre pour mesurer des tensions continues en volts. Vérifiez la tension, puis déconnectez le fil amenant la tension d'alimentation positive au 555. Quand le timer est privé d'alimentation et que son bruit n'est plus émis, je parie que la tension de référence change. Bien que le 555 ne consomme pas énormément de puissance en générant son sifflement (peut-être 20 mA), elle suffit à faire chuter la tension de la pile de 9 V. Cela modifie suffisamment la tension de référence pour perturber le fonctionne-

ment de l'amplificateur opérationnel qui réduit alors la tension au point E et arrête le timer. En cessant de siffler, il consomme moins de courant, la tension de la batterie remonte, le timer réémet alors son signal, ce qui peut provoquer des oscillations.

Même si vous n'observez pas ce phénomène, vous risquez de le rencontrer (ou entendre des bruits hachés incessants) lorsque la tension de votre pile diminuera au fur et à mesure de son utilisation normale.

Voici quelques solutions possibles. Aucune ne me convient vraiment mais elles ont le mérite d'être simples.

1. Utilisez toujours une source d'alimentation appropriée plutôt qu'une pile. Ma version de ce circuit fonctionne de façon assez fiable avec une alimentation stabilisée de laboratoire mais avec quelques hésitations avec une alimentation secteur multi-tensions ordinaire.
2. Utilisez deux piles de 9 V, l'une pour la partie supérieure du circuit, l'autre pour la moitié inférieure. Le pôle positif de l'une des piles alimente l'amplip, l'autre pile alimentant le temporisateur. En revanche, les deux piles ont la même masse.
3. Utilisez une alimentation de tension supérieure (12 V DC ou plus) que vous connecterez à un régulateur de 9 volts. Cela devrait compenser les fluctuations de la consommation de puissance.
4. Augmentez la valeur de la résistance en série avec le haut-parleur. Toutefois, cela réduira le volume alors que l'idée est d'émettre un son puissant quand quelqu'un parle bruyamment.

En fait, nous ne devrions pas hésiter avec un tel circuit pour le faire fonctionner correctement. Comme je l'ai déjà dit, il devrait résister à toute épreuve. Je pense que le bricoler pour le faire fonctionner était une erreur. Il aurait été préférable d'essayer un circuit complètement différent.

Échec ?

Tout cela signifie-t-il que mon circuit est un échec ? Non, je n'aime pas ce mot, car il implique que ce qui a été réalisé est vain, sans intérêt. En réalité, la quasi-totalité des personnes qui réussissent ont essayé des stratégies qui étaient mauvaises. En général, les gens réussissent parce qu'au lieu de déclarer forfait, ils tirent des enseignements de leurs essais.

Si quelque chose fonctionne parfaitement la première fois, on apprend peu. En revanche, si l'on rencontre des problèmes, alors l'apprentissage commence réellement. Ainsi, qu'avons-nous appris cette fois ?

- Des instabilités peuvent exister dans un circuit qui comporte un amplificateur. Des bouclages indésirables et des oscillations sont fréquents.
- L'alimentation n'est pas seulement une source de tension passive, mais une partie active du circuit. Une pile connaît des limites qui ne sont pas celles d'une alimentation secteur.
- Vous devez vérifier le fonctionnement d'un circuit en utilisant différentes options (telles qu'une alimentation différente), au lieu de déclarer « ça fonctionne avec mon montage fonctionne, si ce n'est pas le cas pour le vôtre, c'est votre problème ».
- Si une partie d'un circuit a une compatibilité limitée avec la section suivante, c'est probablement insuffisant.

Encore un détail

Alors que je bricolais le circuit, il m'est arrivé quelque chose que je n'ai pas encore mentionné. J'ai posé le haut-parleur près du microphone. Pouvez-vous deviner ce qui s'est alors passé ? Un retour du son. Lorsque le haut-parleur diffusait le son strident de contestation, le microphone le captait. Comme le microphone n'est pas assez sophistiqué pour faire la différence entre un cri intense et le sifflement de protestation, cela provoquait une réaction du circuit qui demeurait actif. Le bruit tournait ainsi en boucle et ne pouvait pas arrêter le fonctionnement du circuit.

Il s'agit là d'un problème de conception, et non un problème dû aux composants. Le principe d'un appareil qui réagit au cri d'une personne, en émettant un bruit strident éventuellement plus puissant était une erreur dès le départ : le circuit se perturbe lui-même !

Aviez-vous anticipé cela quand j'ai écrit les spécifications ? Je ne l'ai pas prévu car j'avais une vision étroite, ce qui est fréquent dans la conception d'un nouveau dispositif. J'étais concentré sur l'objectif (dans ce cas, émettre un bruit en réponse à quelqu'un en train de crier) et oubliais d'élargir ma réflexion.

Souvent, on ne découvre pas un problème évident avant d'avoir réalisé un prototype fonctionnel. On est

alors dans l'embarras et tout le monde dit : « Cela aurait dû être évident ! »

Il est important de retenir que, peu importe votre niveau d'expertise, vous pouvez passer à côté d'un problème « évident ». Voici un exemple classique pris au hasard : Steve Jobs gardait dans sa poche l'un des premiers prototypes d'iPhone depuis une quinzaine de jours et l'utilisait de façon expérimentale, deux mois avant sa mise en production. Il a alors découvert que le plastique de l'écran du téléphone avait été rayé et égratigné en très peu de temps. Il aurait dû s'en douter. Cela aurait dû être évident n'est-ce pas ?

Les concepteurs de l'iPhone pensaient sûrement que le plastique était la seule solution car un écran en verre serait trop facilement brisé. Mais quand Steve Jobs a vu

son écran rayé, il a voulu le changer pour un écran en verre, bien que le téléphone soit presque en production et que le type de verre fin et très résistant dont il avait besoin ne soit pas encore disponible en quantités suffisantes. Il a été confronté à un problème « évident » auquel personne n'avait réellement réfléchi mais au lieu de l'ignorer et de l'accepter, il a entrepris un effort de recherche considérable pour le résoudre.

Grâce à cette anecdote, je ne vais pas juste ignorer le problème en me justifiant ainsi : « on peut arrêter le dispositif contestataire pour qu'il ne se réenclenche pas lui-même, c'est suffisant », ou en réagissant ainsi : « le contestataire de bruit ne fonctionne pas correctement, oublions-le et passons à la suite ». Non, je vais faire ce que vous feriez si vous développiez un produit se révélant être défectueux. Je vais y remédier.

Une contestation réussie

Dans un premier temps, je vais énoncer de nouveau le problème. Dans l'expérience précédente, j'ai développé le concept original de « contestataire de bruit », qui consiste à émettre un bruit de protestation en réponse au cri d'une personne, mais le bruit ne s'arrête jamais. Dès lors, comment puis-je corriger cela ?

Une solution serait de placer un filtre audio sur le microphone afin que le circuit soit en mesure d'entendre le cri d'une personne tout en faisant abstraction de son propre bruit. Cela serait possible mais je doute que cela soit très fiable. Une autre solution serait de limiter la durée du son de contestation, par exemple à deux secondes, puis de respecter une pause après l'arrêt du bruit. À la fin de celle-ci, l'appareil étant silencieux, il ne pourrait pas se réenclencher de lui-même et s'il n'y a plus de cris, l'appareil ayant rempli sa tâche, il peut garder le silence. En revanche, si quelqu'un crie à nouveau, le cycle se répétera.

Cette solution est plus complexe que les spécifications originales mais c'est souvent ce qui se passe après avoir réalisé un prototype. Même s'il fonctionne correctement, on trouve généralement qu'il manque quelques fonctions souhaitables et on réalise alors une seconde version. Dans tous les livres que j'ai écrits et dans tous les gadgets que j'ai créés, après avoir livré au client la version initiale, le client ou moi-même avons souhaité l'améliorer.

Tout est dans le timing

Comment imposer une durée à la sortie de contestation ? En utilisant un temporisateur bien entendu ! Il fonctionnera en mode monostable.

Comment faire suivre cela d'une pause ? Et si l'on synchronisait un second timer à l'aide du premier à

la fin de son cycle ? C'est tout à fait réalisable. Dans *L'Électronique en pratique*, j'ai expliqué comment un timer peut en déclencher un autre. Le mieux est de nommer mes deux nouveaux temporisateurs afin de pouvoir les différencier. Je les appellerai « timer de durée » et « timer de pause ».

Le timer de durée est déclenché par l'ampli-op. Attention, tous mes problèmes ont commencé à partir de là dans la version précédente. Certes, mais la broche de gâchette d'un 555 se comporte assez différemment de sa broche de réinitialisation. D'une part, si la tension d'alimentation est de 9 V DC, la gâchette nécessite seulement une tension inférieure à 3 V DC, alors que la broche de réinitialisation requiert une tension inférieure à 1 V DC. D'autre part, s'il y a des fluctuations de tension après le démarrage du timer, elles sont ignorées jusqu'à la fin de son cycle.

C'est pourquoi il est important de bien lire les fiches techniques pour y apprendre ces détails. De ce fait, je crois que je peux rendre la broche de la gâchette compatible avec la sortie du LM741.

Le signal de sortie du timer de durée déclenche un générateur de bruit externe qui attire réellement l'attention des gens. Un avertisseur coûte peut-être quelques euros alors qu'il faut compter une dizaine d'euros pour une sirène d'alarme. Chaque élément peut fonctionner avec une pile de 9 V.

Quand le timer de durée atteint la fin de son cycle, sa sortie devient basse ce qui provoque l'arrêt de l'avertisseur externe. Ce sera également transmis à travers un condensateur de liaison au timer de pause qui sera déclenché par la chute brutale de la tension. Le timer de pause démarrant son cycle doit d'une façon ou d'une autre empêcher le circuit de redémarrer.

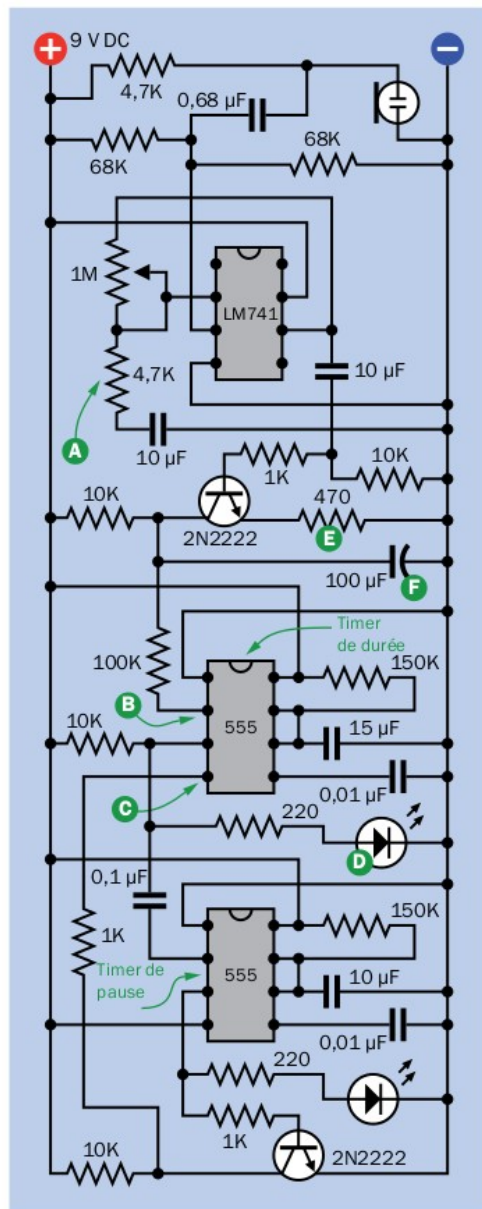


Figure 14-1. Version améliorée du contestataire de bruit, corrigeant les faiblesses de la version originale.

Je peux peut-être utiliser la sortie du timer de pause pour porter au niveau bas la broche de réinitialisation du timer de durée. Quoi, nous voici à nouveau en train d'utiliser la broche de réinitialisation ?

Certes, mais la sortie du timer de pause sera un signal continu, sans fluctuation et ce sera plus fiable que d'utiliser la sortie d'un ampli-op transmise au travers d'un transistor. Je pense que ça va fonctionner.

À la fin de la pause, le timer de pause libère celui de durée afin que le cycle puisse se répéter si quelqu'un crie à nouveau.

La version finale du circuit est schématisée sur la fig. 14-1. J'ai également mis à jour l'organigramme de la fig. 13-9 pour tenir compte de la nouvelle logique. La version revue de cet organigramme est présentée sur la fig. 14-2.

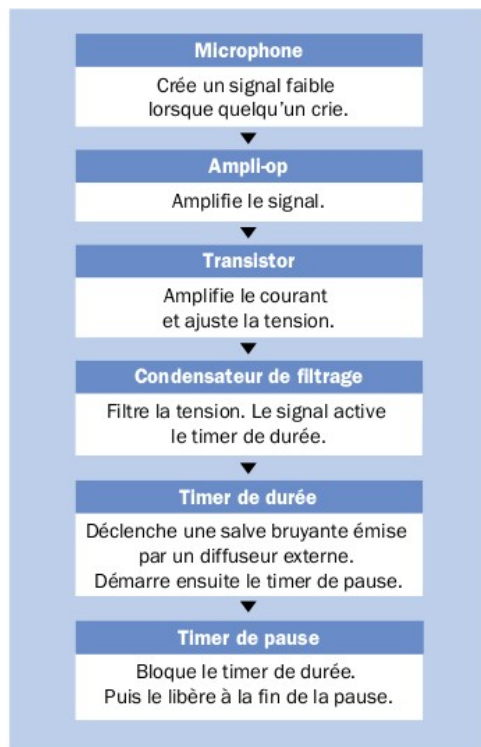


Figure 14-2. Organigramme montrant le fonctionnement logique de la version finale du «contestataire de bruit».

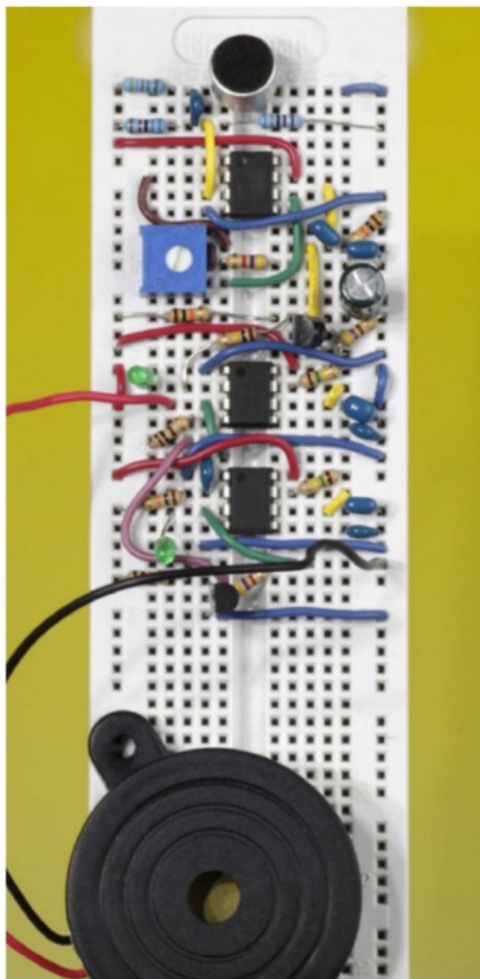


Figure 14-3. Version finale du « contestataire de bruit ». Le gros composant rond et noir est un puissant avertisseur. Le circuit fonctionne avec une pile de 9 V pendant un temps limité.

Résumé des modifications

L'un des changements notables concerne la valeur de la résistance de retour à la masse qui permet de doser la contre-réaction négative du LM741 : elle est passée de 10K à 4K7. Je l'ai indiquée dans le nouveau schéma par la lettre A de couleur verte. Ce changement augmente

le gain de l'amplificateur opérationnel et facilite son réglage à l'aide d'un potentiomètre de 1M.

Le câblage du transistor 2N2222 a aussi été modifié : au lieu de désactiver le timer 555, il déclenche maintenant le timer de durée par un signal bas. Rappelez-vous, cette tension doit être inférieure à 3 V (un tiers de la tension d'alimentation). Reliez votre multimètre au point marqué B et découvrez sa réaction lorsque vous criez devant le microphone.

La sortie de timer de durée pilote une LED à seule fin de démonstration. J'ai repéré cette LED par D dans le schéma. Pour que le circuit fonctionne de façon utile, remplacez la LED par un petit avertisseur sonore. Si vous souhaitez émettre un bruit encore plus fort, reliez le circuit à un appareil externe plus puissant par l'intermédiaire d'un relais. Un optocoupleur serait préférable car il isolerait les composants sensibles du LM741 et le diffuseur de puissance. Un petit relais électromécanique devrait cependant convenir.

Pendant le fonctionnement du timer de durée, sa sortie est au niveau haut. À la fin de son cycle, la sortie devient basse. Cette transition est transmise par le condensateur de liaison de 0,1 μ F, qui contrarie momentanément le niveau imposé par la résistance de rappel de 10K, déclenchant alors le timer de pause. La sortie de ce timer est reliée à un transistor, situé en bas du schéma, qui la convertit en niveau bas destiné à neutraliser le timer de durée en forçant sa broche de réinitialisation au niveau bas. Vérifiez au point C que cette tension varie maintenant correctement. La LED à la sortie du timer de pause est incluse uniquement pour vous assurer qu'il fonctionne. Cette LED pourra être supprimée dans la version finale du circuit.

Lorsque vous aurez terminé de câbler le circuit, mettez-le sous tension. La mise sous tension initiale peut activer un timer ou l'autre. C'est tout à fait normal, vous pouvez l'ignorer.

Pour vérifier que les temporisateurs fonctionnent, reliez brièvement à la masse la broche 2 (gâchette) de chacun d'eux. La LED devrait s'allumer dans chaque cas. Vous pouvez également utiliser votre multimètre pour contrôler la tension de gâchette du premier temporisateur. Lorsque vous émettez un bruit élevé en face du microphone, la tension devrait baisser.

Le test au bruit

Faites maintenant votre « Aaah » en le maintenant aussi longtemps que possible. Après une possible hésitation initiale, vous devriez apercevoir la première LED briller pendant environ deux secondes. Imaginez alors que sa sortie déclenche le diffuseur externe de puissance. Cette LED s'éteint ensuite et la seconde LED s'allume, vous indiquant alors que le timer de pause désactive le timer de durée. Vous pouvez alors continuer à faire autant de bruit que vous voulez, le timer de durée n'y réagira pas et sa LED restera éteinte jusqu'à la fin du cycle du timer de pause.

Si vous reliez votre multimètre au point B, vous constaterez peut-être des fluctuations de la tension, mais elles sont maintenant sans effet car ce circuit accepte une plus grande marge d'erreur.

Ma réalisation du « contestataire de bruit » fonctionne parfaitement et je pense que la vôtre devrait également vous satisfaire. Voici, néanmoins, quelques compléments sur son fonctionnement.

Le condensateur électrochimique de 100 μF (signalé F dans le schéma) est nécessaire pour filtrer le signal provenant de l'ampli-op via le transistor. Mais ce condensateur met environ une seconde pour se charger. Pendant ce laps de temps, le timer de durée ne peut pas répondre. Cela signifie simplement qu'un délai existe entre le moment où quelqu'un commence à crier et l'instant où le bruit de protestation est émis. Pour la même raison, quand la personne cesse de crier, le condensateur prendra une seconde pour se décharger et vous obtiendrez un cycle de protestation supplémentaire.

Personnellement, ce comportement me plaît car le circuit accorde un délai de grâce à la personne bruyante, mais s'il comprend qu'elle continue à crier, il ajoute un cycle de dissuasion supplémentaire afin d'être sûr que le message est bien transmis.

Si vous préférez une réaction plus rapide, utilisez un condensateur de filtrage de 47 μF . Cela pourrait provoquer des déclenchements spontanés du timer de durée, car un condensateur de filtrage plus faible autorise la transmission de davantage de pics de tension. Pour arrêter les déclenchements, il suffit de modifier légèrement le réglage du potentiomètre de 1M. Ce nouveau réglage de sensibilité devrait tout de même assurer un fonctionnement correct.

Il reste cependant de légères différences de comportement de ce circuit selon qu'il est alimenté par une pile de 9V ou une alimentation de laboratoire. La pile charge le condensateur de 100 μF plus lentement et procure une sensibilité plus faible. Si le potentiomètre de 1M ne vous offre pas un réglage correct, vous pourrez toujours augmenter la sensibilité du circuit en diminuant la valeur de la résistance de 4K7 repérée A dans le schéma.

J'ai mis au point ce circuit pour qu'il fonctionne avec un adaptateur secteur, car il absorbe une puissance trop importante pour être alimenté par une pile de 9 V sauf pour une courte démonstration.

J'ai utilisé la version plastique du transistor 2N2222. Si vous préférez la version à encapsulation métallique qui amplifie davantage, il sera peut-être nécessaire d'ajuster la valeur de la résistance de 470 Ω , indiquée par la lettre E dans le schéma.

Je n'ai rencontré aucun problème d'oscillation parasite, mais si tel est votre cas, tentez d'augmenter la valeur du condensateur de 100 μF repéré par la lettre F.

Pour aller plus loin

Lors de l'élaboration de ce projet, je pensais à quelques idées de réalisations. L'un de mes amis a deux enfants qui augmentent exagérément le volume de la télévision. Au lieu de leur crier sans arrêt de baisser le son de la télévision, il pourrait installer ce « contestataire de bruit » pour y parvenir.

Une autre possibilité serait d'utiliser cet appareil comme système d'alarme de voiture, en le plaçant à l'intérieur, collé sur une vitre. Toute vibration soudaine serait alors décelée par le microphone électret.

Si le chien de votre voisin est particulièrement bruyant, vous pourriez déclencher un transducteur ultrasonique en repréailles grâce à la sortie du « contestataire de bruit ».

Une de mes amies m'a fait remarquer qu'elle pourrait utiliser elle-même le « contestataire de bruit » pour lui rappeler de ne pas crier après son collègue de travail lorsqu'elle est en colère de voir un projet ne pas progresser assez rapidement.

Personnellement, j'apprécie le but initial du contestataire de bruit. Je souris en imaginant Bob Widlar, pionnier de l'électronique, mettre en place un tel dispositif dans son bureau. Lorsqu'il agaçait quelqu'un (ce qui,

semble-t-il, se produisait assez souvent), il lui suffisait d'attendre confortablement assis que le ton monte assez pour atteindre le seuil critique à partir duquel son contestataire de bruit se déclenche. Cela devait probablement agacer encore davantage son visiteur.

Est-ce réalisable avec un microcontrôleur ?

Le convertisseur analogique-numérique d'un microcontrôleur classique traite une gamme de tensions supérieure à celle que peut produire un microphone. Je pense donc que vous devriez amplifier le signal du microphone à l'aide de l'amplificateur opérationnel, puis relier sa sortie au microcontrôleur. En fait, vous pourriez acquérir un micro électret à souder à la surface d'un petit circuit imprimé comportant un amplificateur de type CMS (Composant monté en surface).

Autre solution, certains microcontrôleurs possèdent un gain programmable. Vous serez néanmoins toujours confronté à un signal alternatif que vous devrez échantillonner très rapidement afin de déterminer son amplitude. Il serait vraiment plus facile au microcontrôleur de traiter le signal après redressement ou filtrage. Cela nécessiterait l'utilisation d'un transistor et d'un condensateur car l'ampli-op ne délivre pas assez de puissance pour permettre un redressement correct de son signal de sortie.

Vous devriez donc utiliser bon nombre de composants identiques à ceux du circuit existant.

Après cela, la programmation d'un microcontrôleur réagissant à une entrée est chose aisée. Créer un signal de sortie bruyant, marquer une pause, puis attendre à nouveau une réaction au signal d'entrée est également très facile. En fait, vous pouvez même ajouter de nouvelles possibilités.

Écrivez, par exemple, un programme dénombrant le nombre de cris dans un laps de temps donné. Plus bruit augmente, plus le microcontrôleur émet le son dissuasif. En intégrant quelques composants, le microcontrôleur émettra un bruit dissuasif de plus en plus puissant au fur et à mesure qu'il se déclenche.

Je suis sûr que vous pouvez imaginer de telles options, mais, que vous ayez recours ou non à un microcontrôleur, vous devrez toujours savoir comment utiliser un amplificateur opérationnel.

Et après ?

Les amplificateurs opérationnels ont beaucoup d'autres usages, mais certaines applications impliquent des concepts complexes. Je vous laisse parcourir la littérature appropriée si vous êtes intéressé par ce sujet. (Personnellement, j'aime le livre *Make Analog Synthesizers*.)

Il est temps maintenant d'aborder les circuits intégrés digitaux. Je préfère les composants numériques pour différentes raisons. Ils communiquent entre eux sans se soucier de compatibilité de tensions, ils ne surréagissent jamais et n'amplifient pas les petits défauts des signaux, parasites, pics ou creux. Leurs sorties et leurs entrées sont soit hautes, soit basses dans des limites raisonnables. Vous pouvez les considérer on ou off, ou en binaire, 1 ou 0.

Bob Widlar n'avait aucun attrait pour les circuits numériques et l'utilisation du code binaire. Il paraît qu'il avait déclaré : « Tout imbécile peut compter jusqu'à 1 ». Tout le monde n'est cependant pas aussi compétent que Bob, et pour nous, les circuits digitaux sont reposants par rapport aux comportements capricieux des circuits avec lesquels tout fluctue de façon imprévisible.

C'est tellement plus logique !

Dans *L'Électronique en pratique*, j'ai rédigé une introduction aux circuits logiques mais en ignorant les plus complexes. Ainsi, je n'ai pas abordé les circuits multiplexeurs ou les registres à décalage. Les circuits numériques de cette sorte sont aujourd'hui moins largement répandus qu'auparavant, leur fonctionnement logique reste cependant fondamental pour tous les circuits des calculateurs. Maintenant, développons de façon plus approfondie le domaine de ces circuits, apprenons leur fonctionnement et utilisons-les pour notre plaisir.

Test de télépathie

Ce premier projet de logique paraît extrêmement simple. Vous avez uniquement besoin de quatre interrupteurs à bouton-poussoir, deux circuits intégrés et une diode LED. Mais en approfondissant, vous vous apercevez que ce n'est finalement pas aussi évident qu'il n'y paraît. Le but avoué de cette expérience est de tester votre perception extrasensorielle, souvent connue sous son acronyme PES. J'appellerai donc ce circuit le « testeur de télépathie ».

Fondamentaux : PES

Depuis de nombreuses décennies, les chercheurs à la limite des sciences conventionnelles ont recherché l'existence de capacités paranormales du cerveau humain. J. B. Rhine fut l'un des pionniers en ce domaine à l'université Duke. Son livre *Extrasensory perception* est paru en 1934 et il a continué à publier ses travaux jusque dans les années 1970. Ses publications ont été maintes fois critiquées en raison du fait qu'à plusieurs occasions, il a avoué avoir découvert que ses assistants trichaient. Peut-être croyaient-ils réellement à la PES ? Ils ne voulaient pas qu'un seul jour infructueux porte préjudice à leurs résultats.

Gardez cela à l'esprit lors de la réalisation de ce projet : si des personnes pleines de bonnes intentions sont capables de se tromper elles-mêmes, elles peuvent vous abuser aussi.

Préparation

Lire dans les pensées n'est pas si fréquent (si cela existe réellement), il s'agit donc d'adopter une approche statistique, effectuant des dizaines ou même des milliers de tentatives pour comparer le taux de réussite avec ce que l'on peut attendre du hasard lui-même.

L'expérience décrite ici est prévue pour être utilisée en ce sens. Deux boutons-poussoir sont placés face à une personne et deux autres face à une seconde personne, assise en face. Un écran empêche les deux personnes de voir leurs mains. La fig. 15-1 page suivante présente une vue de dessus de ce à quoi je pense. Vous pouvez ne pas être enclin à construire l'ensemble, particulièrement si vous ne connaissez pas de collaborateurs appropriés. Mais vous pouvez improviser et assembler les composants du circuit pour comprendre son fonctionnement.

J'appelle les participants Annabelle et Boris, car j'aime les noms différents et faciles à retenir. Ils seront abrégés A et B dans certains schémas.

Vous noterez que les boutons devant Annabelle sont marqués A0 et A1 tandis que ceux faisant face à Boris sont appelés B0 et B1. Le but est qu'ils pressent les boutons directement opposés l'un à l'autre en tentant de détecter leur intention télépathiquement. Si Annabelle presse le bouton A0 et Boris le bouton B0 ou s'ils appuient sur A1 et B1, l'expérience réussit. Inversement s'ils choisissent A0 et B1 ou B0 et A1, il s'agit d'un échec.

Il existe quatre combinaisons possibles, mais deux seulement sont bonnes. La probabilité d'y parvenir est de 50-50.

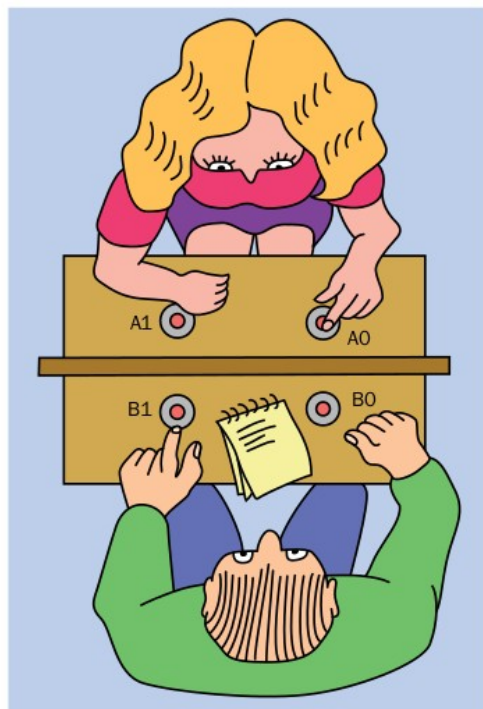


Figure 15-1. Annabelle et Boris vus de dessus, prêts pour le test de perception extrasensorielle.

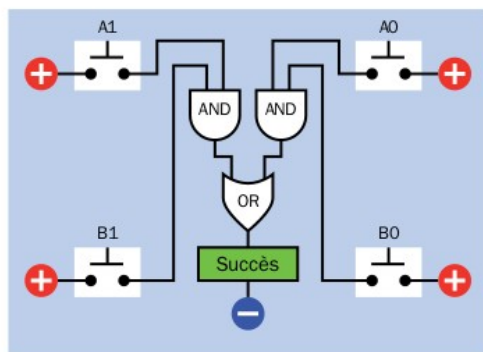


Figure 15-2. Ces portes logiques activent un signal « Succès » si A0 et B0 ou A1 et B1 sont pressés simultanément.

Un écart sensible par rapport à cette prévision pourrait venir du fait qu'une personne ait pu influencer l'autre par un pouvoir psychique ou bien que quelqu'un triche.

Je reviendrai plus tard sur la découverte de la tricherie.

La fig. 15-2 explique comment utiliser des portes AND et OR conjointement aux boutons-poussoir pour confirmer si un essai est réussi.

Si vous ne vous souvenez pas des symboles et fonctions associés aux portes logiques, les six portes de bases sont représentées sur les fig. 15-3 et 15-4, les niveaux d'entrée et sortie haut et bas sont indiqués en rouge et noir respectivement.

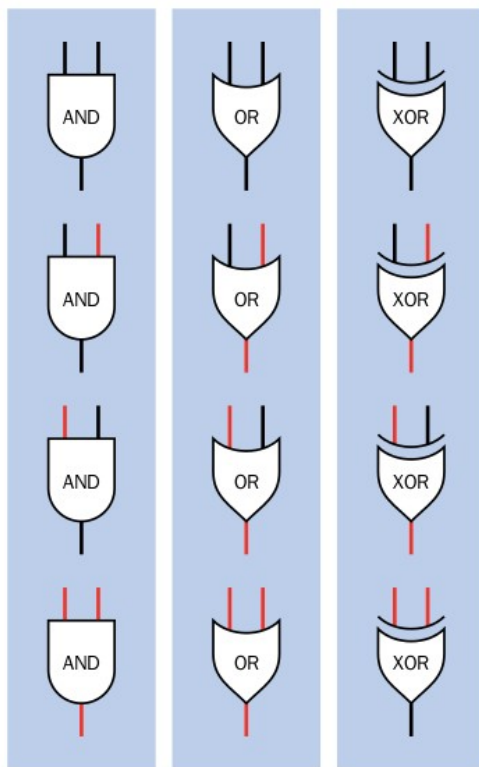


Figure 15-3. Les entrées sont généralement placées en haut de chaque porte logique alors que les sorties sont en bas. Si chacune des deux entrées peut avoir un niveau haut ou un niveau bas (représenté en rouge ou noir sur cette figure), il existe quatre combinaisons possibles, chacune produisant une sortie définie ci-dessus.

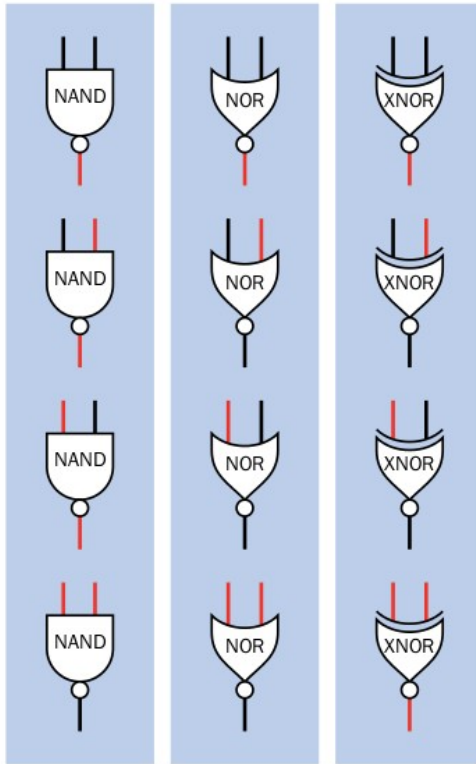


Figure 15-4. Entrées et sorties des portes NAND, NOR and XNOR. Une ligne rouge révèle un état haut, alors qu'une ligne noire indique un état bas.

À titre de référence, sur la fig. 15-5 sont exposées les quatre combinaisons possibles des entrées dans la colonne de gauche et les états de sortie correspondants à droite pour chaque porte.

Chaque fois que j'utilise des symboles logiques pour le développement d'un circuit, il est possible d'en vérifier la logique grâce à un logiciel de simulation et de démontrer son comportement. Par exemple, <http://www.neuroproductions.be/logic-lab/> est un logiciel gratuit de simulation en ligne. Vous devrez peut-être restructurer mes schémas logiques pour les entrer dans le simulateur, car j'ai l'habitude de représenter le chemin logique du haut vers le bas alors que le simulateur est plus enclin à le faire de gauche à droite.

Inputs	Output	Output	Output

Figure 15-5. Ce tableau de référence montre les quatre combinaisons possibles d'entrée et la sortie correspondante pour chacune des portes.

En tout cas, un simulateur logique est juste une étape intermédiaire avant la réalisation d'un circuit.

En bref : les circuits logiques

- Chaque porte logique est constituée de nombreux transistors gravés sur du silicium. À l'origine, les boîtiers à fils traversants (DIP), comportaient 14 broches. Ils sont toujours fabriqués de nos jours, bien que les versions montées en surface (CMS) soient très largement utilisées.
- Bien que les calculateurs ne soient plus fabriqués à partir de circuits intégrés logiques, les portes logiques ont toujours leurs adeptes comme dans la *glue logic*, une logique simple destinée à interfacier les différentes sections d'un circuit imprimé entre elles.
- Un circuit intégré de 14 broches peut contenir quatre portes à deux entrées, deux portes à quatre entrées ou une à huit entrées. Ces configurations sont connues sous le nom quadruple, double ou simple porte, décrivant le nombre de portes présentes dans le circuit intégré.
- Toutes les portes à l'intérieur d'un circuit intégré fonctionnent indépendamment les unes des autres.
- Les entrées inutilisées d'une porte doivent être reliées à la masse afin d'éviter qu'elles réagissent aux bruits et aux parasites électromagnétiques.
- Une entrée ou une sortie haute s'approche du niveau de la tension d'alimentation alors qu'un niveau bas

est proche de 0 V DC. Il existe également des circuits à logique négative mais ils sont peu utilisés.

- Les familles logiques sont les générations successives de circuits intégrés qui ont été développées. Je vais utiliser la famille 74HC00, ainsi nommée car toutes les références commencent par 74, HC signifiant haute vitesse en technologie CMOS. Deux, trois ou quatre chiffres remplacent les 00 pour identifier chaque type de circuit. Quand cela sera nécessaire, j'utiliserai également quelques anciens circuits de la famille CMOS 4000B.
- Faites bien attention en commandant vos circuits car les variantes des types traversants ou montés en surface portent une référence pratiquement identique. La plupart des boutiques en ligne permettent de choisir le type de boîtier correct dans leurs systèmes de recherche.
- Les circuits intégrés logiques sont conçus pour être reliés en chaîne, la sortie de l'un se connectant à l'entrée du suivant, à condition d'appartenir à la même famille.
- Tous les circuits logiques sont dits « générateurs » de courant quand leur sortie est haute et « absorbeurs » de courant quand leur sortie est basse.
- Chaque circuit de la famille HC peut générer ou absorber un courant continu de 25 mA, ce qui suffit pour allumer une LED. Cependant, lorsqu'un circuit absorbe une telle intensité, sa tension de sortie diminue. Vérifiez la tension avec votre multimètre lorsque vous pilotez une LED et utilisez cette sortie vers un autre circuit avec prudence. Augmentez la valeur de la résistance en série avec la LED si nécessaire.
- Quand un bouton-poussoir ou un interrupteur SPDT est relié à l'entrée d'une porte logique, ne permettez pas à la tension de cette entrée de « flotter » quand l'interrupteur est ouvert. Utilisez pour cela une résistance de rappel afin de maintenir un potentiel haut ou bas (voir la fig. 15-6).
- Un diagramme logique n'est pas identique à un schéma traditionnel avec des composants. Dans les diagrammes logiques, tel que celui de la fig. 15-2, les alimentations des portes logiques n'apparaissent généralement pas et les résistances de rappel sont également omises. Dans un schéma traditionnel, les circuits intégrés sont représentés avec leurs connexions et toutes les alimentations nécessaires.

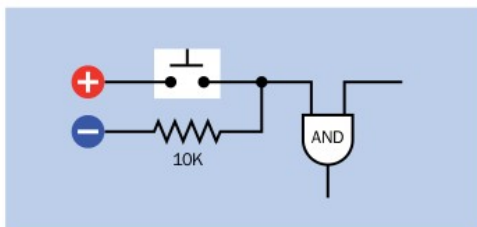


Figure 15-6. Si une tension positive est appliquée à une entrée par un bouton-poussoir ou un interrupteur électromécanique, une résistance de rappel vers la masse doit être utilisée pour éviter de laisser « flotter » l'entrée quand la connexion est ouverte. Si les pôles sont inversés, la résistance de rappel doit être reliée au pôle positif de l'alimentation.

La logique PES

Le concept de la fig. 15-2 est très simple. Il pourrait être résumé par la phrase suivante.

Si les boutons-poussoir A0 ET B0 sont pressés OU si les boutons A1 ET B1 le sont, le résultat est positif. Il existe un rapport évident entre les mots ET et OU de cette phrase et les portes ET (AND) et OU (OR) du diagramme logique.

Je vais dorénavant considérer le rectangle vert sur le diagramme comme un « indicateur », mais ce pourrait être une simple LED qui s'allume pour indiquer à Annabelle et Boris qu'ils ont parié correctement (ou que chacun a lu dans la pensée de l'autre si vous pensez que c'est ce qui se passe).

Parfait, la logique est simple mais prenez le temps de réaliser ce circuit. Comme toujours, mettre la main à la pâte est le meilleur moyen d'apprendre.

Réalisation

Vous trouverez le schéma des connexions internes des quatre portes logiques NAND et OR de chaque circuit intégré sur la fig. 15-7.

La fig. 15-8 présente le schéma correspondant au diagramme logique. J'ai inclus une représentation miniature des portes à l'intérieur des circuits intégrés pour montrer ce qui se passe. Le signe « & » représente un circuit AND et « O » un circuit OR. (Il ne s'agit pas d'abréviations standardisées.)

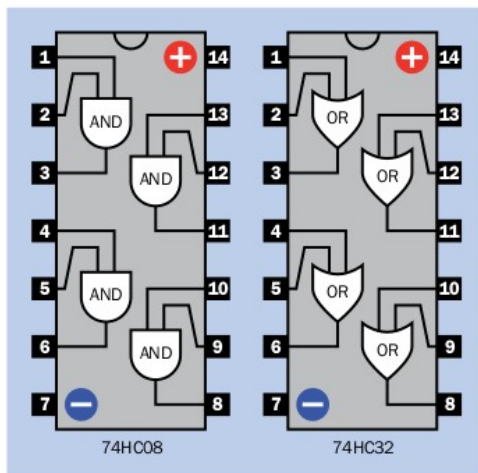


Figure 15-7. Chaque circuit intégré de 14 broches contient quatre portes logiques NAND ou OR distinctes, comportant deux entrées comme ci-dessus. Ces circuits sont des quadruples portes à deux entrées.

Le bus d'alimentation positif est maintenant sur le côté droit du schéma, ce qui est pratique pour alimenter les circuits recevant l'alimentation positive sur leur broche 14 dans chaque cas. La plupart des circuits de la suite de ce livre auront leur alimentation positive du côté droit. Faites bien attention de ne pas inverser la polarité des fils de l'alimentation de vos composants car ils pourraient ne jamais s'en remettre.

La réalisation sur la plaque de montage de ce circuit est représentée sur la fig. 15-9 page suivante.

Je n'ai pas montré le régulateur 7805 et les deux condensateurs, obligatoires avec les circuits intégrés de la famille 74HC00. Chaque fois que la mention « 5 V DC régulés » est précisée sur un schéma, vous savez que le régulateur de tension et ses deux condensateurs sont obligatoires. Les entrées inutilisées des circuits intégrés doivent être reliées à la masse pour éviter les réactions aux parasites électriques ambiants. Les sorties inutilisées de chaque porte peuvent rester non reliées.

Si vous appuyez sur les boutons marqués A0 et B0, ou sur le boutons marqués A1 et B1, vous constatez que la LED s'allume. Mais maintenant que vous êtes face au circuit, je pense vous convaincre facilement qu'il doit être sérieusement amélioré pour devenir réellement utilisable.

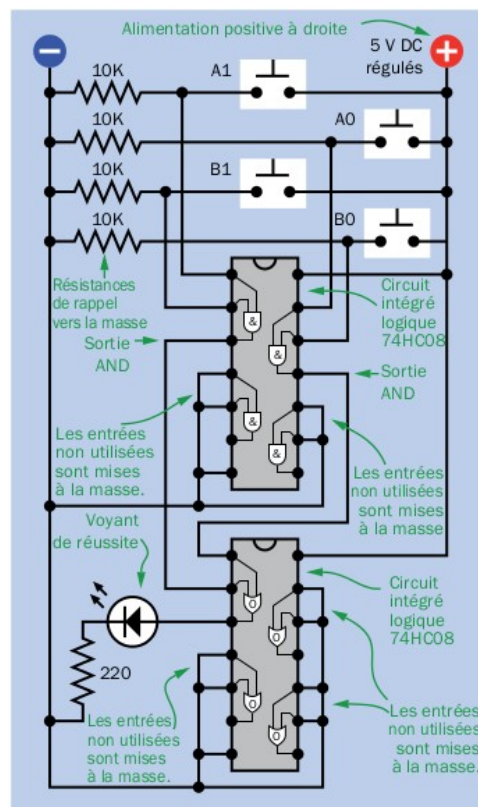


Figure 15-8. Ce schéma représente la version simple du testeur de télépathie en vue de sa réalisation pratique.

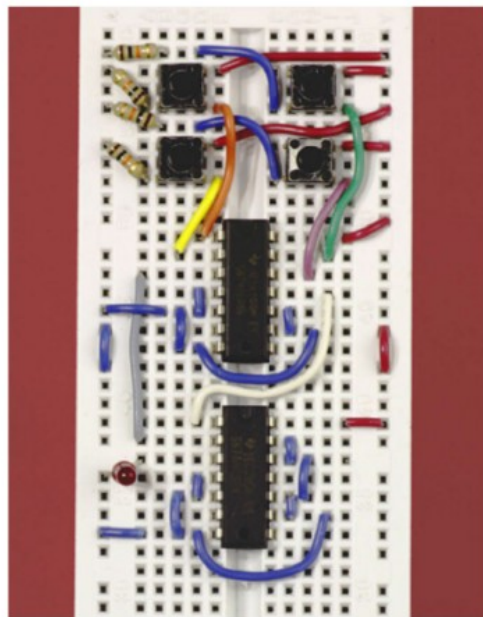


Figure 15-8. Version de démonstration simple du testeur de télépathie. Les boutons-poussoir des participants sont groupés en haut de la platine. La LED en bas et à gauche est l'indicateur de sortie.

Améliorations

Je pense qu'il est souhaitable d'ajouter quelques notifications pratiques et de prévenir la tricherie.

- Dans un testeur de PES, Annabelle ne doit pas être en mesure de distinguer le bouton sur lequel Boris appuie et inversement. Cela crée une difficulté : comment chaque personne sait-elle quand le prochain match commence ? Un indicateur « prêt » est donc nécessaire pour prévenir Annabelle quand Boris aura appuyé sur un bouton alors qu'elle n'aura pas encore pressé le sien ; et un indicateur « prêt » pour Boris quand Annabelle aura appuyé sur un bouton alors qu'il n'aura pas encore pressé le sien.
- Comme je l'ai déjà mentionné, même les personnes les plus sincères peuvent être tentées de tricher si elles croient que leur pouvoir de perception télépathique nécessite un peu d'aide ce jour-là en particulier. Malheureusement, dans notre testeur de télépathie, il est très facile de tricher. A ou B peut garantir un résultat positif en appuyant simultanément sur ses deux boutons-poussoir !
- À ce point, seul un indicateur s'allume quand Annabelle et Boris ont réussi. Nous devrions réellement disposer d'un indicateur supplémentaire, activé quand ils échouent.

Dans l'expérience suivante, je vais implémenter ces nouvelles fonctions et obtenir quelques résultats surprenants.

Testeur de télépathie amélioré!

Avant de vous montrer le schéma revu, je vais rappeler les besoins par écrit. Je pense qu'une description verbale devrait toujours être la première étape du développement d'un diagramme logique. La seconde étape consiste à convertir le diagramme logique en schéma traditionnel utilisant les composants.

Êtes-vous prêt?

L'ajout d'un indicateur « prêt » à notre testeur de télépathie semble assez facile. Je peux expliquer cette tâche de la manière suivante.

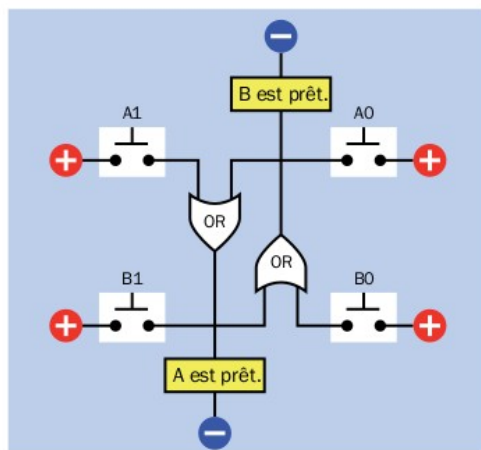


Figure 16-1. Deux portes OR peuvent être utilisées pour montrer à un participant si l'autre a déjà appuyé sur un poussoir. Le voyant « prêt » ne révèle pas quel bouton a été activé.

« Si le bouton A0 OU (OR) le bouton A1 est appuyé, un voyant lumineux avertit Boris qu'Annabelle est prête.

Inversement, si B0 OU (OR) B1 est pressé, un autre voyant indique à Annabelle que Boris est prêt. »

Ces deux phrases sont traduites en un diagramme logique sur la fig. 16-1. Par souci de clarté, je l'ai représenté séparément du diagramme logique précédent de la fig. 15-2. Les deux diagrammes sont combinés sur la fig. 16-2, car vous pouvez prendre la sortie d'un seul bouton-poussoir et l'envoyer vers plusieurs entrées logiques. Sur la fig. 16-2, j'ai montré les connexions de la fig. 15-2 en gris afin de les différencier des nouvelles liaisons.

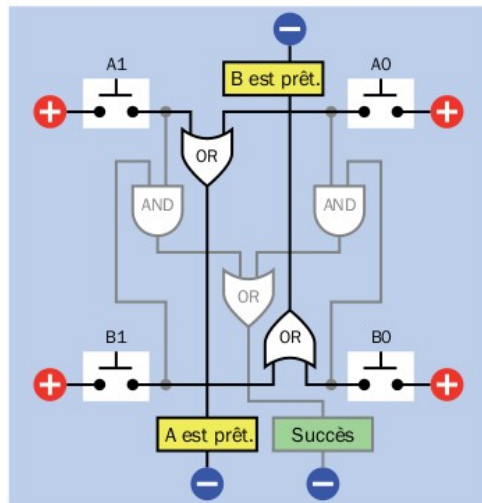


Figure 16-2. Les deux diagrammes logiques précédents ont été combinés afin de partager la sortie de chaque bouton-poussoir entre deux entrées de portes logiques. Malheureusement, la combinaison de plusieurs diagrammes élémentaires mène rapidement à une complexité difficile à interpréter. Afin d'apporter plus de clarté, les liaisons du précédent diagramme sont représentées en gris.

Révélez la tricherie

L'indicateur de triche peut être décrit ainsi.

« Si A0 ET (AND) A1 sont pressés simultanément, un indicateur signale qu'Annabelle triche. Inversement, si B0 ET (AND) B1 sont pressés simultanément, un voyant montre que Boris triche. »

La fig. 16-3 illustre ceci dans un nouveau diagramme logique. À nouveau, il peut être combiné avec les autres diagrammes en partageant la sortie de chaque bouton-poussoir entre plusieurs portes logiques.

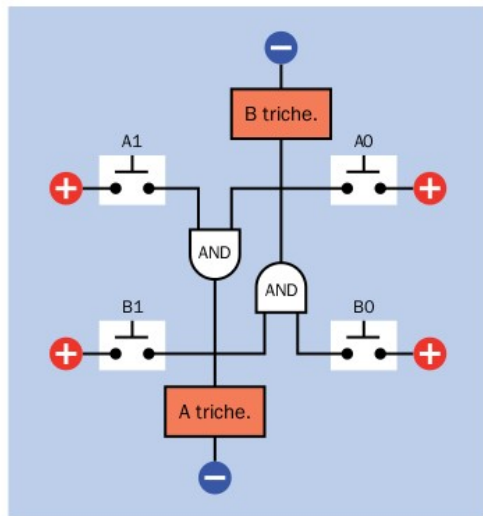


Figure 16-3. En ajoutant deux portes AND, on peut savoir si l'un des participants a triché en appuyant simultanément sur ses deux boutons.

Indiquez l'échec

Enfin, abordons le voyant « Échec ». Si les joueurs pressent les boutons qui ne se correspondent pas, l'expérience est un échec. À nouveau, cela peut être facilement visualisé. On peut l'exprimer ainsi.

« Si A0 ET (AND) B1 sont appuyés, OU (OR) si A1 ET (AND) B0 sont appuyés, les joueurs ont perdu. »

Cette affirmation est représentée par le diagramme de la fig. 16-4.

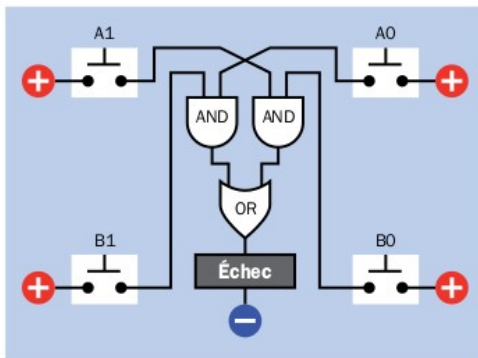


Figure 16-4. Un couple de portes AND alimentant les entrées d'une porte OR indiquera les combinaisons incorrectes des boutons-poussoir activés.

Voulez-vous ajouter ces fonctionnalités à la platine de montage de la fig. 15-8 ? Vous avez pu constater précédemment que plusieurs portes étaient inutilisées dans les circuits intégrés. Comme les portes opèrent indépendamment les unes des autres à l'intérieur d'un même circuit intégré à plusieurs portes, il est possible d'utiliser les portes restées libres pour réaliser les fonctions que j'ai décrites précédemment. Par exemple, l'indicateur « prêt » ne nécessite que deux portes OR et on compte trois portes inutilisées dans le circuit 74HC32.

J'ai envie de dire : « bien sûr, allons-y, ajoutons les nouvelles fonctions ! » Mais peut-être devriez-vous vous abstenir car je ne veux pas vous mettre en colère contre moi si vous réalisez quelque chose qui ne fonctionne pas correctement. Et si vous intégrez les fonctions que je viens de décrire, cela ne fonctionnera pas correctement. Je peux vous le prouver si vous acceptez de vous livrer à un petit exercice de réflexion.

Les conflits

Imaginez que Boris joue en activant simultanément les boutons-poussoir B0 et B1. Au même instant, Annabelle respecte les règles et appuie uniquement sur le bouton A0. Que se passe-t-il alors ?

Les boutons A0, B0 et A1 sont pressés. B0 et B1 révèlent une tricherie, l'indicateur « triche » s'allume comme il se doit. Mais attention, Annabelle appuie sur A0. Comme A0 et B0 sont pressés simultanément, l'indicateur « Succès » est activé ! Ce n'est pas tout. B1 et A0 étant également appuyés, le voyant « Échec » s'allume égale-

ment. Et comme chaque joueur a appuyé au moins sur un bouton, l'indicateur « prêt » s'allume lui aussi.

C'est la catastrophe. *Tous* les indicateurs s'allument ! Qu'est-ce qui ne va pas ? Le problème vient du fait que mes descriptions n'étaient pas judicieuses. J'ai uniquement pensé aux boutons qui devaient être activés pour générer une sortie logique positive. Je n'ai pas pris en compte quels boutons ne devaient *pas* être appuyés pour générer une telle sortie. Par exemple, j'ai commencé la description de la logique « prêt » de la façon suivante.

« Si le bouton A0 OU (OR) le bouton A1 est appuyé, un voyant lumineux doit avertir Boris qu'Annabelle est prête ».

J'aurais dû l'exprimer ainsi :

« Si le bouton A0 OU (OR) le bouton A1 est appuyé, ET (AND) que ni B0 NI (NOR) B1 n'a encore été pressé, un voyant lumineux doit avertir Boris qu'Annabelle est prête. » En d'autres termes, je dois m'assurer que Boris n'a pas encore activé l'un de ses boutons avant de lui confirmer qu'Annabelle attend qu'il choisisse l'un de ses boutons-poussoir.

De la même façon, l'indicateur de réussite et l'indicateur d'échec ne devraient s'allumer que si ni A NI (NOR) B n'a triché.

Hum, le mot NOR vient d'être prononcé deux fois. D'évidence, je vais devoir utiliser une porte logique NOR d'une façon ou d'une autre et tout cela devient très compliqué. Qui s'imaginait qu'un jeu aussi simple provoquerait des résultats inattendus ? Je pense qu'un petit graphique devrait permettre de démêler tout cela.

Démêlez l'affaire

Observez la fig. 16-5. On prend maintenant en compte les boutons-poussoir qui ne doivent pas être pressés, aussi bien que ceux qui doivent l'être. La couleur rouge indique que l'un des quatre boutons A0, B0, A1 et B1 est activé, et la couleur noire qu'il n'est pas pressé. Un bouton grisé avec un X signifie que son état n'a pas d'importance car il n'est pas pertinent pour ce test logique. Sur la droite, sont indiqués les messages qui doivent être créés pour chaque combinaison de boutons. Rappelez-vous que les boutons noirs (non appuyés) sont aussi importants que les boutons rouges (appuyés).

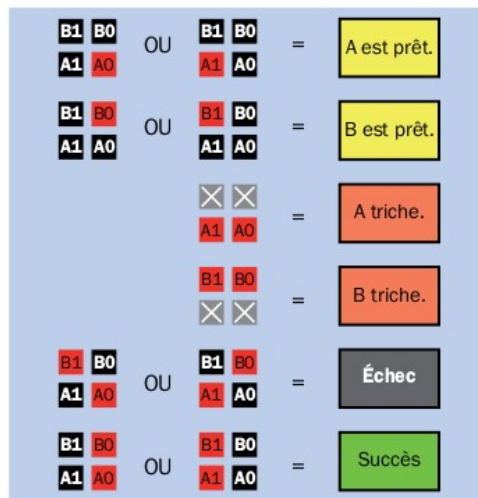


Figure 16-5. Dans ce graphique, A0, B0, A1 et B1 sont les boutons pressés (en rouge) ou relâchés (en noir). Un bouton grisé avec un X indique que son état est sans importance et peut être ignoré. Les rectangles colorés sur la droite représentent les indicateurs qui devraient être allumés, en réponse à chaque combinaison des boutons-poussoir.

Sur la première ligne, Boris devrait uniquement voir le voyant « prêt » allumé par Annabelle si elle a activé un bouton (pas les deux ce qui signifierait qu'elle triche), ET (AND) que Boris n'a appuyé ni sur B0, NI sur (NOR) B1.

La deuxième ligne utilise la même logique pour le voyant « prêt » d'Annabelle.

Sur la troisième et la quatrième ligne, si quelqu'un triche en pressant ses deux boutons simultanément, on ne se soucie pas de ce que l'autre fait.

Les indicateurs « Échec » et « Succès » ne s'allumeront que si les boutons en rouge sont pressés alors que ceux dessinés en noir ne sont pas activés.

Traduisez le graphique

Vous vous demandez peut-être s'il existe d'autres combinaisons de boutons qui pourraient avoir des conséquences que je n'ai pas encore prévues. Eh bien non, le graphique sur la fig. 16-5 reprend toutes les combinaisons possibles des boutons-poussoir (si trois ou quatre boutons-poussoir sont activés simultanément, ces combinaisons sont couvertes par le test de tricherie.)

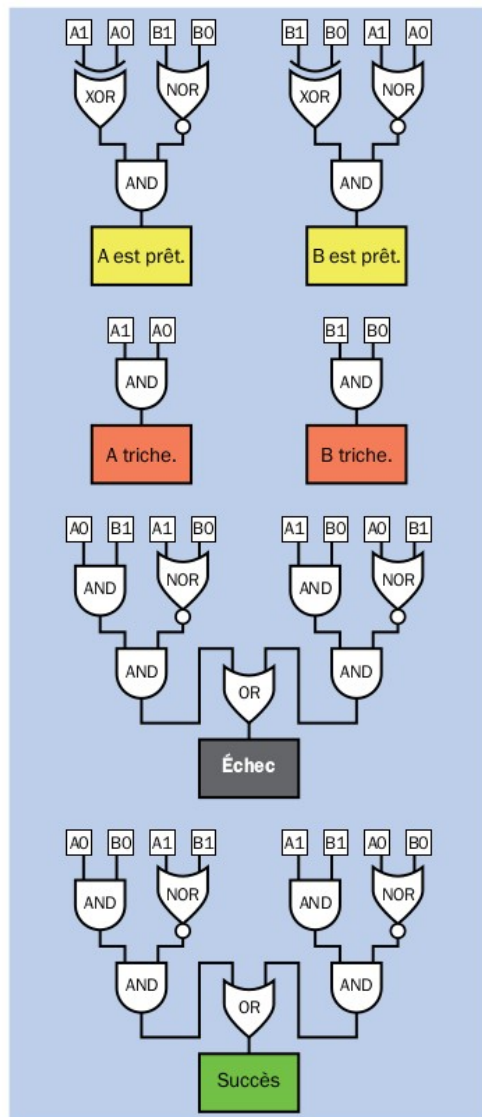


Figure 16-6. Diagrammes logiques simulants les combinaisons de la figure précédente. Chaque entrée (A0, A1, B0, B1) représente la connexion à un bouton-poussoir qui peut être appuyé ou non, délivrant un niveau haut lorsqu'il est pressé, une résistance de rappel vers la masse (non représentée) assurant un niveau bas lorsque le poussoir n'est pas activé.

Je peux donc maintenant traduire chaque ligne du graphique dans un diagramme logique et cette fois, je suis confiant quant à sa réussite. Cependant, je vais avoir besoin de deux nouvelles catégories de portes logiques : NOR et XOR. Si vous ne vous rappelez pas comment elles fonctionnent, reportez-vous à la fig. 15-5.

Voici la description de leur fonctionnement.

- La porte NOR (NON-OU) a sa sortie basse si l'une ou ses deux entrées sont au niveau haut. La sortie devient haute si les deux entrées sont au niveau bas.
- Une porte XOR a une sortie au niveau bas si ses deux entrées sont soit au niveau bas, soit au niveau haut. La sortie passe au niveau haut uniquement si l'une de ses entrées est au niveau haut, l'autre étant au niveau bas. (XOR signifie OU-EXCLUSIF).

Sur la fig. 16-6, vous pouvez découvrir comment ces portes sont interconnectées pour réaliser les tests de la fig. 16-5.

Sur la fig. 16-7, j'ai choisi quatre combinaisons de boutons comme exemples afin d'examiner le fonctionnement à l'aide du diagramme logique concernant la commande du voyant « A est prêt ». Dans les deux cas du bas, l'indicateur n'est pas allumé.

Les diagrammes de la fig. 16-6 peuvent se résumer de la façon suivante.

- Vérification de l'indicateur « Joueur A prêt » : si A0 ou A1 est haut (mais pas les deux), ET (AND) ni B0 NI (NOR) B1 n'est appuyé, l'indicateur « A est prêt » s'allume.
- Vérification de l'indicateur « Joueur B prêt » : si B0 ou B1 est haut (mais pas les deux), ET (AND) ni A0 NI (NOR) A1 n'est appuyé, l'indicateur « B est prêt » s'allume.
- Vérification de l'indicateur « A triche » : si A1 ET (AND) A0 sont appuyés simultanément, l'indicateur « A triche » s'allume.
- Vérification de l'indicateur « B triche » : si B1 ET (AND) B0 sont appuyés simultanément, l'indicateur « B triche » s'allume.

Les choses se compliquent maintenant.

- Vérification de la situation « Échec » : si A0 ET (AND) B1 sont pressés ET (AND) que ni A1 NI (NOR) B0 n'est appuyé, l'indicateur « Échec » s'allume. OU (OR) si A1 ET (AND) B0 sont pressés ET (AND) que ni A0 NI (NOR) B1 n'est appuyé, l'indicateur « Échec » s'allume.

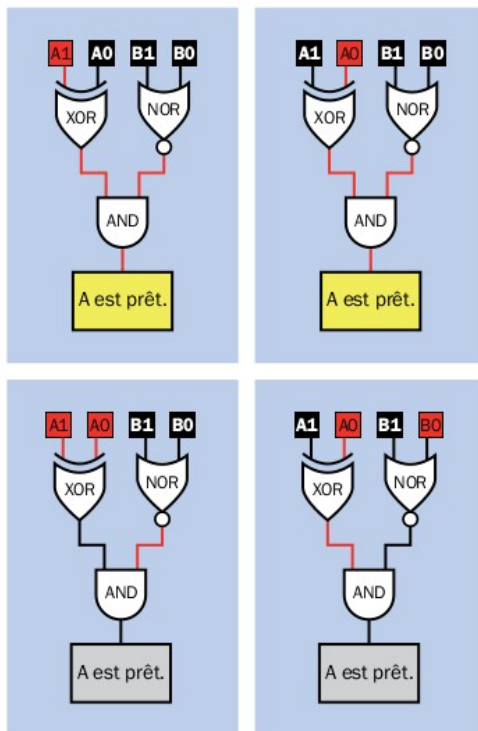


Figure 16-7. Exemple de quatre combinaisons arbitraires des boutons-poussoir pour le test « prêt » du joueur A.

- Vérification de la situation « Succès » : si A0 ET (AND) B0 sont pressés ET (AND) que ni A1 NI (NOR) B1 n'est appuyé, l'indicateur « Succès » s'allume. OU (OR) si A1 ET (AND) B1 sont pressés ET (AND) que ni A0 NI (NOR) B0 n'est appuyé, l'indicateur « Succès » s'allume.

Ces affirmations sont déterminées par chaque combinaison des boutons-poussoir de la fig. 16-5. Si vous lisez les phrases à haute voix tout en regardant les symboles des boutons, vous constaterez que ça correspond exactement à chaque cas.

Vous pouvez maintenant réaliser le circuit. Il faut installer suffisamment de circuits intégrés pour disposer des portes logiques nécessaires et relier soigneusement chaque bouton-poussoir aux entrées des portes logiques. Rappelez-vous qu'il est normal de relier un bouton à plusieurs entrées.

Ce projet est devenu beaucoup plus conséquent que ce à quoi vous pouviez vous attendre et cela devient problématique. Ainsi, pour disposer de toutes les portes logiques de la fig. 16-6, vous avez besoin de trois circuits intégrés quadruple AND à deux entrées, un quadruple OR à deux entrées, deux quadruple NOR à deux entrées et un quadruple XOR à deux entrées. Cela fait donc sept circuits qui ne trouveront pas tous une place sur une platine de montage.

Hum ! Ne pourrait-on pas simplifier tout cela ? En fait, si, c'est possible. Réfléchissons-y dans un souci « d'optimisation de la logique ».

Optimisation

Rappelez-vous, j'ai affirmé plus tôt que la situation de tricherie devrait outrepasser toutes les autres situations. Cette idée peut être exploitée pour simplifier le circuit. Je pense à cela : si Annabelle ou Boris triche, il est inutile de penser au succès ou à l'échec. Il faut donc se limiter à l'activation du voyant « Tricherie » et empêcher tout autre voyant de s'allumer, c'est tout.

Pour réaliser cela avec des portes logiques, il faut créer une détection de tricherie. S'il n'y a pas de tricherie, un « OK » sera transmis à la section traitant des conditions de succès ou d'échec. Les indicateurs « Succès » et « Échec » ne s'allumeront qu'en présence du signal « OK ».

J'ai représenté cela sur la fig. 16-8 page suivante. Dans ce diagramme, il s'agit de s'assurer que ni A NI (NOR) B ne triche avant que le signal « OK » ne nous autorise à vérifier s'il y a succès ou échec.

Comment traduire tout cela en portes logiques ? Eh bien, une porte NOR donne une sortie haute si, et uniquement si ses deux entrées sont au niveau bas. Si nous utilisons une entrée basse pour indiquer qu'une personne ne triche pas, la sortie de la porte NOR sera haute tant que personne ne triche.

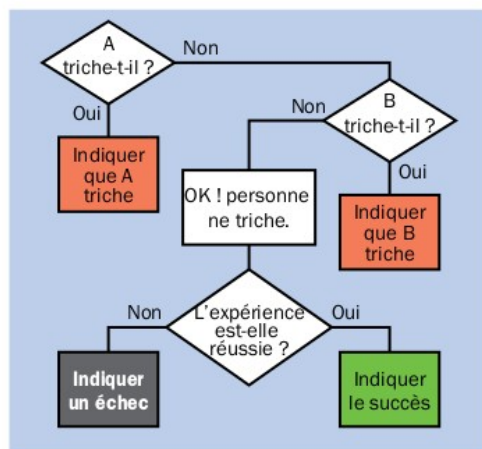


Figure 16-8. Diagramme logique montrant le principe de vérification de l'absence de tricherie avant de déterminer si le pari est réussi ou non.

En bas de la fig. 16-9, une porte NOR a été ajoutée, reliée aux indicateurs de triche de A et B. Tant que NI (NEITHER) Annabelle, NI (NOR) Boris ne triche, la porte NOR délivre une sortie haute. Ceci est ajouté à une porte AND à trois entrées qui nécessite que toutes ses entrées soit hautes avant de pouvoir allumer l'indicateur « Succès » ou « Échec ». Cela équivaut à dire que si l'un ou l'autre des joueurs triche, les voyants « Succès » et « Échec » ne pourront pas s'allumer.

Pour prendre en compte les portes AND à trois entrées, j'ai également dû modifier la logique en bas du diagramme en utilisant quatre portes XOR. Je vous laisse chercher vous-même pourquoi cela fonctionne ainsi. Référez-vous, pour cela, à la fig. 16-5.

Vous vous demandez peut-être quel est le système qui permet de simplifier les diagrammes logiques ? Pour y parvenir, il faut apprendre la notation booléenne et rechercher les fonctions dupliquées ou contradictoires entre elles. Un exemple de ce type est présenté dans Wikipédia mais je le trouve compliqué. Je préfère étudier un diagramme logique et envisager tous les cas possibles afin de découvrir s'il existe d'autres façons d'atteindre le but recherché. Quand je pense avoir trouvé une simplification, j'expérimente chaque combinaison des entrées pour m'assurer que cela fonctionne. Cette approche intuitive s'avère peu classique mais elle est efficace en ce qui me concerne.

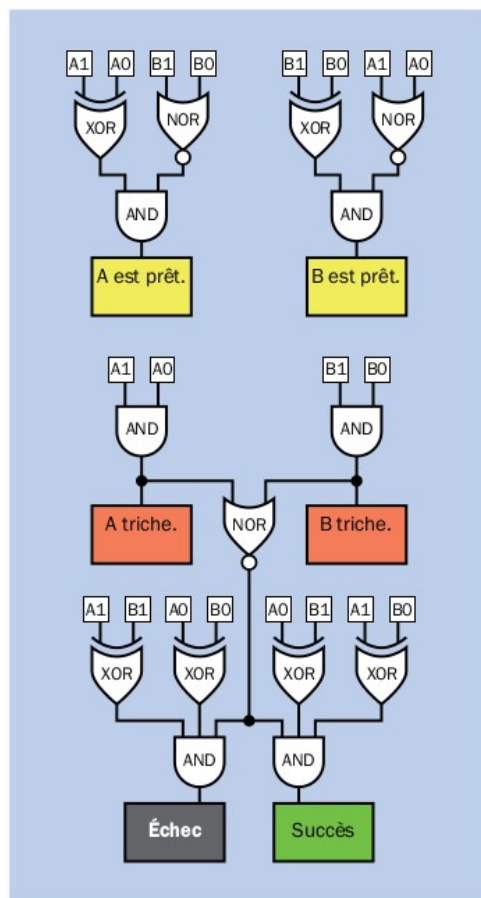


Figure 16-9. Version simplifiée du précédent diagramme avec ajout d'une porte NOR délivrant une sortie haute si ni A, ni B ne triche, avant que le voyant « Succès » ou « Échec » ne puisse être allumé.

Réalisation

Maintenant que le circuit est optimisé, vous pouvez le construire. Vous aurez besoin d'un circuit intégré quadruple AND à deux entrées, un AND à trois entrées, un quadruple NOR à deux entrées et deux quadruples XOR à deux entrées. (Je me suis arrangé pour éliminer le circuit intégré OU.)

Le brochage des circuits intégrés ajoutés est représenté sur la fig. 16-10 et sur la fig. 16-11. Remarquez que les portes NOR sont inversées dans leur boîtier, par rapport aux portes AND, OR et XOR dans le leur. Faites attention en faisant les modifications.

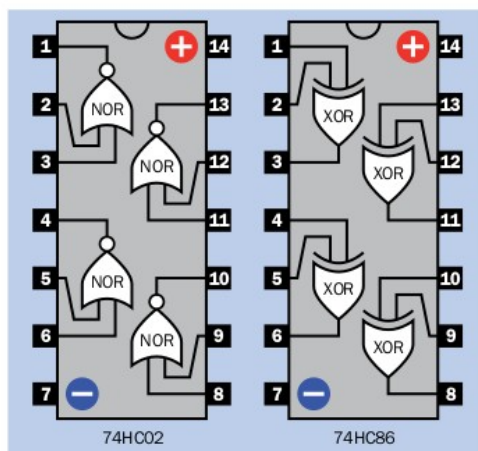


Figure 16-10 Un circuit intégré à 14 broches contient quatre portes NOR à deux entrées ou quatre portes XOR à deux entrées dans les configurations ci-dessus. Il est important de se rappeler que les entrées et les sorties de portes NOR sont inversées par rapport aux celles des portes des autres circuits intégrés comportant des quadruples portes à deux entrées.

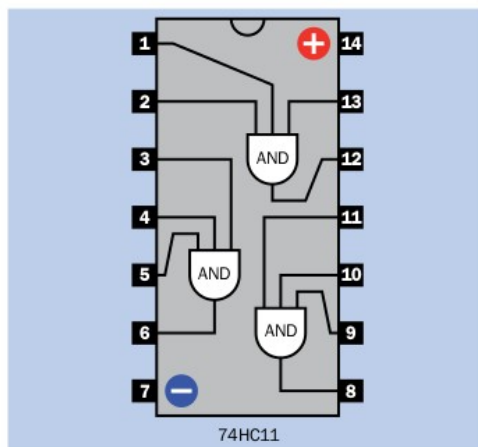


Figure 16-11 Un circuit intégré à 14 broches peut contenir trois portes à trois entrées comme ci-dessus.

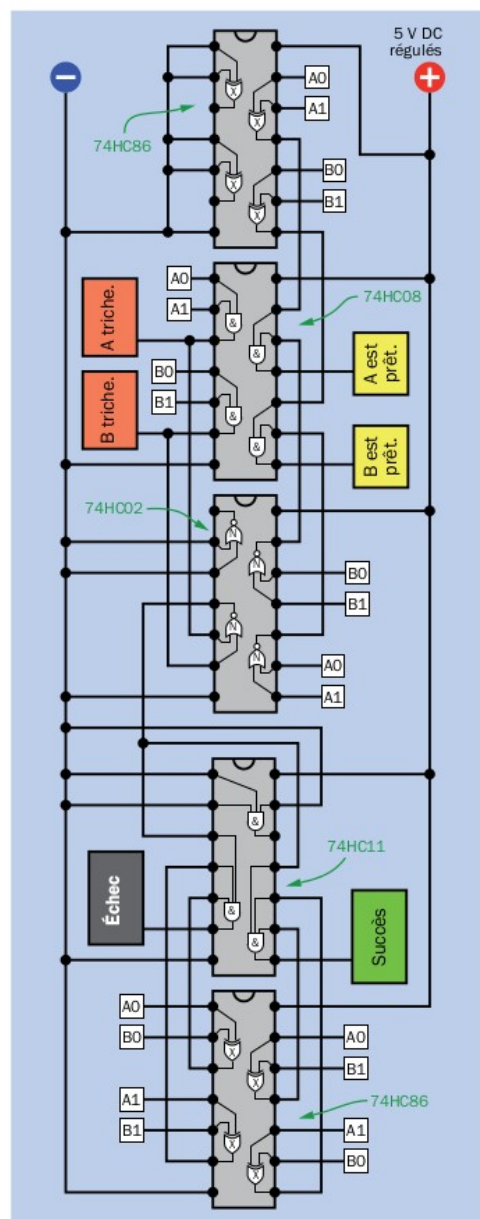


Figure 16-12 Schéma final du «testeur de télépathie».

Observez le câblage complet réalisé sur une plaque de montage sur la fig. 16-12 page précédente. Les portes XOR ont un X à l'intérieur, les portes AND un signe & et les portes NOR sont identifiées par la lettre N. (Ces abréviations ne sont pas standardisées.)

Le schéma sur la fig. 16-12 tenant difficilement sur la hauteur d'une page du livre, j'ai dû laisser de côté les boutons-poussoir (que vous devez monter séparément de toute façon). Ils apparaissent sur la fig. 16-13. La sortie de chaque bouton va vers quatre labels. Reliez chacun de ces labels vers son homologue sur la fig. 16-12. Ainsi, le premier label A0 sur la fig. 16-13 peut être relié au label A0 de la porte XOR en haut de la fig. 16-12 et ainsi de suite. Utilisez du câble plat multicolore pour faciliter cette opération.

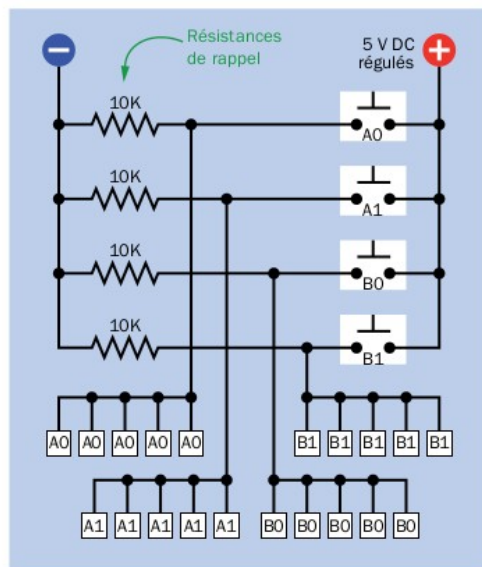


Figure 16-13. Quatre boutons-poussoir SPST, normalement ouverts doivent être utilisés conjointement avec le circuit du « testeur de télépathie ». La sortie de chacun de ces boutons-poussoir est envoyée vers cinq circuits différents. Chaque groupe de cinq entrées étant simultanément haut ou bas, une seule résistance de rappel vers la masse suffit pour chaque groupe.

Vous souhaitez probablement installer les voyants LED séparément. Prenez soin d'ajouter une résistance de 220 Ω en série avec chaque LED afin d'éviter la surcharge des sorties des circuits logiques (à moins que vous n'utilisiez des diodes LED comportant leur propre résistance).

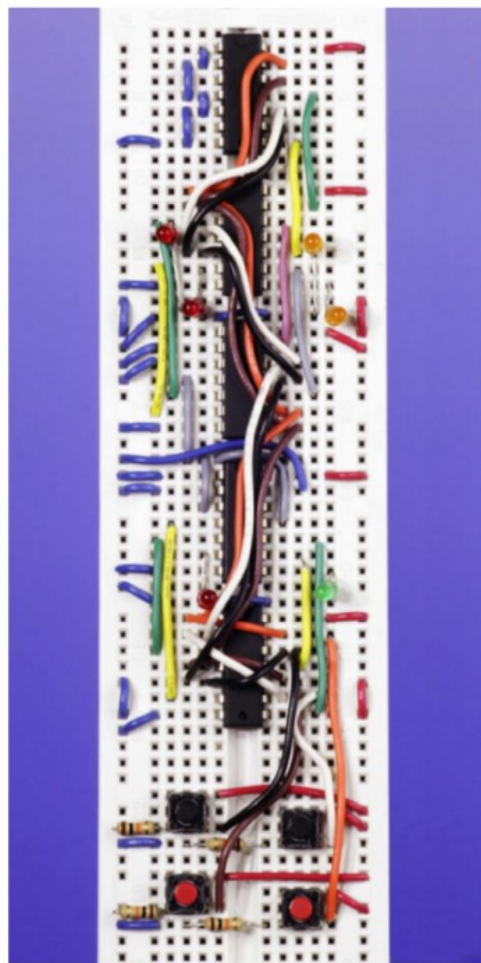


Figure 16-14. Réalisation sur plaque de montage de la version complète du « testeur de télépathie » utilisant cinq circuits intégrés. Six diodes LED visualisent l'état des sorties identifiées dans le schéma. Il n'y a pas de résistances en série avec les LED du fait de l'utilisation de diodes LED à résistance intégrée. Les boutons-poussoir rouges en bas de la figure sont ceux du joueur A tandis que les noirs situés immédiatement au-dessus sont ceux du joueur B. Il s'agit d'une configuration de démonstration du circuit. Une réalisation fonctionnelle du testeur de télépathie nécessiterait que les boutons-poussoir soient déportés afin que chaque joueur ne puisse pas voir le choix de son adversaire.

Vous trouverez sur la fig. 16-14 la réalisation du circuit sur une platine de montage. Après avoir effectué les connexions entre les cinq circuits intégrés, je me suis rendu compte qu'il restait assez de place en bas de la plaque pour les quatre boutons-poussoir. Je les ai donc placés et reliés à leurs entrées logiques respectives. Mais la place manquait pour router les fils des boutons-poussoir de chaque côté de la plaque, certains passent donc au milieu.

Détails

Faites attention que les diodes LED utilisées pour les voyants « Tricherie » (les rectangles orange sur le schéma), ne modifient pas le niveau de sortie de leurs portes AND de façon trop importante. En effet, les sorties de ces portes AND ne servent pas uniquement à alimenter les LED, elles sont également reliées à l'entrée des portes NOR du circuit intégré suivant. Chacune de ces entrées doit être au minimum à 4 volts quand le niveau de sortie de la porte AND qui les alimente est haut. Une LED peut réduire cette tension, vérifiez-la avec votre multimètre.

Si vous décidez de réaliser une version totalement fonctionnelle de ce circuit, au lieu d'une simple version de démonstration, doublez les indicateurs « Succès » et « Échec », un par joueur. Pour contrôler la charge des deux LED mises en parallèle, vous pouvez augmenter les résistances en série ou amplifier la sortie des portes concernées en utilisant une paire de transistors en montage Darlington comme dans le circuit intégré ULN2003. On trouve des circuits intégrés Darlington capables d'amplifier sept ou huit sorties.

Vous pouvez aussi piloter chaque paire de LED en série. L'avantage de cette solution est d'éviter que la puissance délivrée par chaque sortie ne soit perdue partiellement dans les résistances. Le résultat n'est cependant pas garanti, les LED étant sensibles au courant plus qu'à la tension et chaque type de LED présente des caractéristiques différentes. Prenez soin de mesurer l'intensité traversant les LED montées en série et ajoutez une résistance si vous constatez que les diodes LED absorbent un courant supérieur à la valeur nominale spécifiée.

Je vous encourage vivement à réaliser ce circuit, simple à construire, et qui, finalement, n'utilise que peu de composants. La véritable contrainte est d'être précis et minutieux en réalisant les liaisons. Je pense que vous pouvez y parvenir si cela vous tente. Si vous utilisez ce

circuit, rappelez-vous que la décision d'un joueur n'est pas toujours aléatoire et que l'autre joueur peut découvrir la séquence suivie par son adversaire sans que le premier joueur ne s'en doute. Cela nous entraîne dans le domaine de l'aléatoire que j'aborderai plus tard.

La différence numérique

Un examen rapide du schéma sur la fig. 16-12 révèle qu'il est notablement différent des schémas précédents utilisant des amplificateurs opérationnels. Pour commencer, il n'y a pas de condensateur et les seules résistances utilisées sont des résistances de rappel vers la masse. Pas de transistors, non plus ! Cela vient du fait que les circuits intégrés logiques ont été conçus de façon à être reliés les uns aux autres, sans l'aide de composants additionnels. Tant que vous utilisez des circuits de la même famille, la sortie de l'un est garantie compatible avec le suivant.

En plus, vous pouvez répartir la sortie d'une porte logique sur les entrées de plusieurs autres circuits. Par exemple, la sortie de la porte NOR située en bas et à gauche du circuit intégré 74HC02 sur la fig. 16-12, est partagée par les entrées de deux portes AND situées en dessous. La capacité de piloter plusieurs entrées à partir d'une seule sortie s'appelle la *sortance* ; en anglais *fanout*. La série 74HC possède une *sortance* de 10, permettant à chaque sortie de se relier à 10 entrées au maximum.

Faites encore mieux

Une question maintenant, est-il possible d'optimiser davantage notre schéma ? Probablement. Je pense en particulier qu'au lieu de tester séparément les conditions « Échec » et « Succès », je pourrais utiliser la logique suivante : si la porte NOR du centre n'indique pas de tricherie et que la condition « Échec » n'est pas détectée, alors les conditions d'une réussite sont réunies. En d'autres termes, « Succès » pourrait être définie par « non (NOT)-échec ».

Ma tête commence à exploser à l'idée de concrétiser tout cela aussi je ne vais pas optimiser davantage. En revanche, vous devriez vous y risquer vous-même, si la logique vous intéresse. Si vous réussissez à réduire ce circuit à quatre circuits intégrés au lieu de cinq, faites-le-moi savoir. N'essayez pas trop intensément cependant car dans l'expérience suivante, je vais vous montrer que l'on peut réduire à deux le nombre de circuits intégrés

nécessaires si l'on utilise un composant additionnel appelé décodeur. Restez à l'écoute !

Pas si simple ?

À la lecture de la section relative au testeur de télépathie, cela a pu vous sembler trop simple pour être intéressant. Vous avez peut-être le sentiment, maintenant, que finalement c'est *trop compliqué* ! Bon, d'accord, à nouveau, ne vous forcez pas si vous n'en avez pas envie. Tenez-vous-en toutefois à la conclusion à laquelle nous sommes arrivés car certains faits sont récurrents dans le monde des circuits intégrés digitaux.

- Un problème logique qui paraît simple a priori peut devenir très compliqué quand trop de tests ou conditions sont ajoutés. Des conflits peuvent naître. Par conséquent, réfléchissez-y à deux fois avant d'ajouter des fonctionnalités qu'il serait certes agréable d'avoir.
- Les interactions avec l'utilisateur sont toujours problématiques car il est nécessaire d'imaginer toutes les bizarreries du comportement humain qui peuvent se produire et comment les traiter convenablement.
- Il existe des méthodes simples pour concevoir un circuit logique mais elles ne permettent pas de créer le circuit le plus simple utilisant le moins de circuits intégrés possible. Une optimisation pourra toujours simplifier un circuit. Mais cela risque de le rendre plus complexe, difficilement compréhensible, et plus à même de comporter des erreurs de conception, le rendant, en conséquence, plus délicat à modifier.

Les ordinateurs de bureau ont toujours utilisé des microprocesseurs mais des circuits logiques additionnels étaient quand même nécessaires et le nombre de circuits intégrés était un critère essentiel en raison de leur coût élevé. Le testeur de télépathie vous montre la démarche de conception que les développeurs des premiers ordinateurs devaient suivre. Même aujourd'hui, les personnes qui conçoivent les processeurs doivent toujours manipuler des niveaux logiques.

Leur tâche est toutefois facilitée, non seulement grâce à l'amélioration des outils de conception, mais surtout du fait de l'existence des logiciels de simulation permettant de tout vérifier.

Peut-on utiliser un microcontrôleur ?

La réponse est bien entendu oui, absolument oui ! Chaque bouton serait alors relié à une entrée du microcontrôleur et il vous faudrait écrire un programme tenant compte des différentes possibilités d'appui sur les boutons-poussoir. Ce programme utiliserait des instructions IF-THEN (si alors) pour traiter les différentes combinaisons.

Des erreurs de logiques seraient toujours possibles, (et même probables) mais au bout du compte, la démarche de conception serait beaucoup moins casse-tête et la réalisation matérielle plus aisée. Au lieu de quinze portes logiques de cinq circuits intégrés, vous n'auriez besoin que d'un microcontrôleur. Si quelqu'un me demandait aujourd'hui de lui construire un testeur de télépathie, il ne fait aucun doute que j'utiliserais un microcontrôleur. Cependant, mon propos est, ici, de vous montrer comment les choses fonctionnent. La logique est absolument fondamentale dans tous les circuits digitaux et le meilleur moyen de l'apprendre (comme toujours) est encore par la pratique. Pour ce faire, il n'existe rien d'autre que ces bons vieux circuits intégrés logiques.

Il existe cependant deux alternatives. Comme je l'ai déjà dit, on peut utiliser un circuit décodeur qui comprend de multiples portes logiques, vous n'avez donc pas à en relier entre elles un aussi grand nombre. J'y viendrai dans les expériences 19 et 20.

L'autre possibilité serait de remplacer chaque porte logique par seulement une paire d'interrupteurs électromécaniques.

Je vais vous montrer le circuit d'un jeu qui peut être réalisé avec des interrupteurs, mais vous verrez qu'il peut toujours être conçu à partir de circuits intégrés logiques ou même en employant une combinaison de circuits logiques et d'interrupteurs si vous préférez.

Pierre, Feuille, Ciseaux !

Pierre, Feuille, Ciseaux est un jeu ancien, internationalement connu mais, au cas où vous n'y auriez jamais joué, en voici les règles. Deux joueurs se font face, en comptant jusqu'à trois, chacun fait un geste de la main qui symbolise :

- une pierre, si le poing est fermé ;
- une feuille de papier si la paume de la main est à plat ;
- une paire de ciseaux si deux doigts forment un V.

Le gagnant est celui dont le symbole prend le dessus. La pierre broie les ciseaux, les ciseaux coupent la feuille et la feuille enveloppe la pierre.

Il existe une similarité évidente avec le testeur de télépathie, deux joueurs se font face, essayant de deviner les intentions de l'autre. Mais on constate des différences qui auront un impact sur la version électronique du jeu. En premier lieu, chaque joueur a trois choix au lieu de deux. Ensuite, si les deux joueurs font le même choix, le coup est nul. Enfin, si leur choix diffère, l'un d'entre eux remporte le coup, l'autre le perd.

Histoire de probabilités

Supposez un instant que la télépathie n'existe pas. Doit-on en conclure pour autant que Pierre, Feuille, Ciseaux est un jeu de pur hasard ?

Non, les joueurs sont deux êtres humains et leurs choix ne sont jamais totalement aléatoires. En réalité, beaucoup de gens ont des idées tout à fait irrationnelles sur le hasard.

Par exemple, il est courant de penser que si vous jouez à pile ou face et que la face apparaît dix fois de suite, il est plus probable que la pièce affiche le côté pile la

fois suivante. C'est ce que l'on appelle « le sophisme du joueur » ou encore « l'erreur de maturité des chances », ayant pour origine le 18 août 1913 au casino de Monte-Carlo où le noir est sorti 26 fois consécutives à la table de la roulette. Beaucoup de joueurs ont perdu énormément d'argent en pariant des sommes importantes sur le rouge, dès la moitié de cette série de tirages identiques. Après tout, pensaient-ils, si le noir est déjà apparu dix, quinze ou même vingt fois, le rouge devrait sortir lors des prochains tirages.

Cette conviction est une illusion car une roulette n'a pas de mémoire. Pas plus qu'une pièce de monnaie. Si vous avez obtenu la face une douzaine de fois de suite, la pièce ne le sait pas. En conséquence, la probabilité que la face soit à nouveau tirée est exactement identique à ce qu'elle était auparavant.

En revanche, les gens sont différents. Ils gardent leurs choix en mémoire et cela influe sur leurs décisions. Si votre adversaire à Pierre, Feuille, Ciseaux se rappelle d'avoir joué trois fois de suite la pierre, il est probable qu'il choisira une autre figure la prochaine fois. Il pensera probablement que pour se comporter de façon imprévue, il ne doit pas se répéter. Il préférera sans doute la feuille ou les ciseaux au prochain tour.

Vous pouvez tirer avantage de cela en choisissant les ciseaux. En effet, en ce cas, vous remportez le coup ou il y a match nul. Quoi qu'il en soit, vous ne perdrez pas.

Mais si vous vous trouvez face à un joueur expérimenté, il pourrait penser que vous ne l'imaginez pas capable de se répéter à nouveau. En conséquence, il recommencerait une fois de plus, juste pour défier vos prévisions.

Que se passerait-il si vous le connaissiez assez pour envisager son comportement ? Vous seriez à même, une fois de plus, d'anticiper son choix et modifieriez

vosre stratégie en conséquence – mais s'il s'en aperçoit, il adaptera la sienne.

Ce processus récursif dans lequel les gens essaient de deviner leur choix réciproque est un thème commun dans le domaine fascinant de la théorie des jeux, une branche des mathématiques devenue si importante dans les années 1960 qu'elle a influencé les règles du bureau des affaires étrangères des États-Unis et la course à l'arme atomique.

Fondamentaux : la théorie des jeux

La théorie des jeux est devenue une discipline en 1944 quand le génie de l'informatique John Von Neumann a publié *Theory of Games and Economic Behavior*, conjointement avec Oskar Morgenstern. Les concepts ont été revus au début des années 1950 et sont rapidement devenus populaires parmi les théoriciens du laboratoire d'idées RAND, la cellule de réflexion installée à Washington DC.

La théorie des jeux décrit toute situation où deux (ou plus) « joueurs » recherchent une stratégie pour acquérir un avantage sans que chacun ne dispose de toutes les informations concernant l'autre, et inversement, ou ne pouvant se faire mutuellement confiance. Dans une partie de poker, par exemple, un joueur peut bluffer pendant que les autres essaient de savoir s'il bluffe et dans ce cas, comment y répondre. La réponse peut alors, en retour, influencer le joueur qui avait choisi de bluffer jusqu'à ce que, finalement, les cartes soient révélées et que l'un des joueurs gagne.

Le bluff peut également intervenir dans un conflit militaire, la compétition et les tentatives pour anticiper la réaction de l'adversaire. Cela a conduit les conseillers de RAND corporation, comme Herman Kahn, à défendre l'idée qu'il pourrait être rationnel, dans certaines circonstances, que l'Union soviétique frappe en premier les États-Unis. Les deux nations devaient donc s'équiper des moyens leur permettant de frapper une seconde fois, à titre de dissuasion, après avoir souffert de la première attaque.

Vous trouverez une description simple des hypothèses de la théorie des jeux sur le site http://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_des_jeux_en_relations_internationales.

Selon l'une d'entre elles, les joueurs se comportent rationnellement afin de maximiser leur propre intérêt. Encore faut-il qu'un homme d'état trouve « rationnel » de tuer des centaines de millions d'êtres humains d'un

autre pays et de le transformer en un champ de ruines radioactives pour prendre l'avantage ?

Peut-être que non – mais la théorie des jeux affirme que vous ne pouvez pas en être certain. Les États-Unis ont alors dépensé des milliards de dollars pour développer la bombe à hydrogène et déployer des missiles dans des silos conçus pour résister à une attaque préventive.

Cela peut sembler éloigné du domaine des jeux comme Pierre, Feuille, Ciseaux, mais les seules différences sont l'échelle, le nombre de paramètres et la gravité des enjeux.

La logique

Comment représenter la logique du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux ? Si vous avez suivi les étapes du développement du testeur de télépathie, cela ne devrait pas être trop difficile. La logique de base pour le joueur A est représentée sur la fig. 17-1.

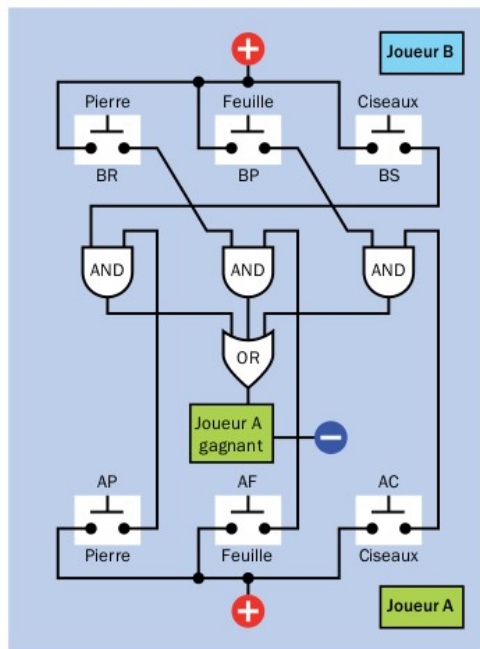


Figure 17-1. Ce réseau de portes logiques affichera le message « Gagnant » en réponse à l'une des trois combinaisons gagnantes possibles pour le joueur A dans le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux.

Annabelle et Boris jouent à ce jeu sous leur précédente identité, joueur A et joueur B et chacun d'eux a le choix entre trois boutons-poussoir marqués Pierre, Feuille et Ciseaux. Pour plus de clarté, j'ai identifié les boutons d'Annabelle AP, AF et AC et ceux de Boris, BP, BF et BC.

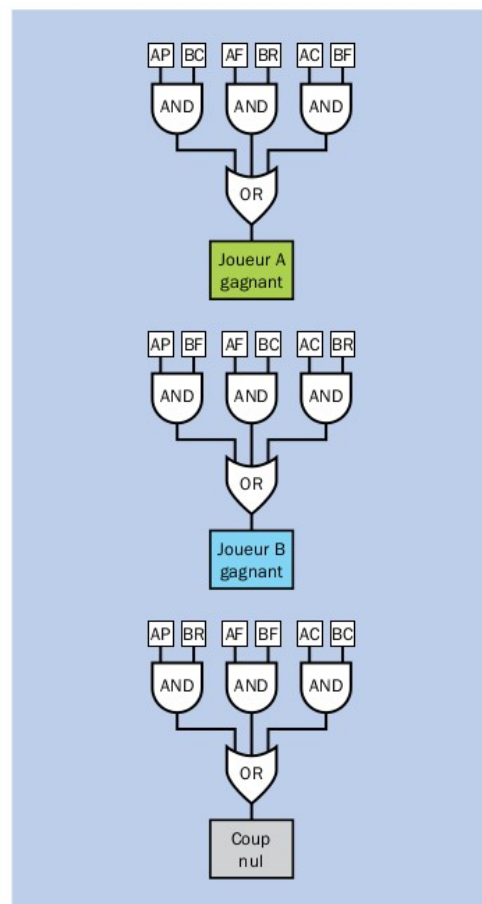


Figure 17-2. Trois réseaux logiques permettent de visualiser les combinaisons gagnantes des boutons-poussoir et de coups nuls pour le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux.

Si Annabelle appuie sur le bouton Pierre alors que Boris presse le bouton-poussoir Ciseaux, Annabelle gagne car la pierre broie les ciseaux. Si A presse le bouton Feuille et B celui de la Pierre, A gagne à nouveau car le

papier enveloppe la pierre. Si A appuie sur Ciseaux et B sur Feuille, A gagne toujours, les ciseaux découpant la feuille. Ces trois possibilités de victoire sont représentées sur la fig. 17-1, comme vous le constatez en suivant les liaisons.

Boris a bien entendu ses trois propres moyens de gagner et il existe également trois possibilités de coup nul si Boris et Annabelle appuient sur les boutons-poussoir identifiés de la même manière. Ceci est illustré sur la fig. 17-2.

A priori, rien de plus simple. Mais, comme toujours, les problèmes surgissent dès qu'il s'agit de considérer la jouabilité du jeu et les possibilités de tricher.

Lequel est activé ?

Comme dans le testeur de télépathie, le jeu de boutons-poussoir de chaque joueur doit être caché à l'autre. Après chaque coup, il n'y a aucune confirmation visuelle du bouton activé par chacun des joueurs. Nous ne disposons que des trois indications « Joueur A gagnant », « Joueur B gagnant » ou « Coup nul ».

Une LED s'allume à côté de chaque poussoir activé mais seulement après que les deux joueurs ont exprimé leur choix. Comment faire ? Eh bien, expliquons la logique.

Dans un premier temps, il faut attendre la fin du jeu, que le joueur A gagne, que ce soit le joueur B ou qu'il s'agisse d'un coup nul. Si j'utilise un circuit OR pour réaliser cela, je peux y relier les trois possibilités de fin du jeu présentes sur la fig. 17-2. Le résultat est illustré sur la fig. 17-3 page suivante. Les trois alternatives de fin de partie sont envoyées sur chacune des trois entrées de la porte OR qui, lorsque sa sortie est au niveau haut, indique la fin de la partie, peu importe le résultat. Cette sortie est reliée, ainsi que chaque bouton-poussoir, aux deux entrées d'une porte AND permettant à la diode LED correspondante de s'allumer. Pour gagner de la place, les LED sont représentées par un cercle jaune dans le diagramme. Chaque LED est identifiée par les mêmes lettres que le bouton-poussoir qui l'active.

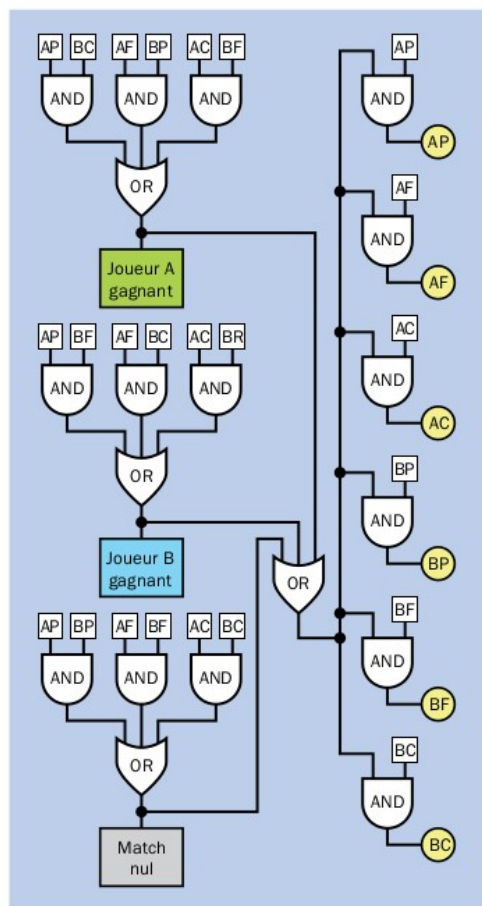


Figure 17-3. Réseau logique évitant que la LED placée près de chaque bouton-poussoir ne s'allume avant que la partie soit terminée.

Qui triche ?

Tout cela devient compliqué (une fois de plus). Mais le pire est à venir (à nouveau) en raison de la possibilité de tricher. Comment pouvons-nous indiquer que quelqu'un viole les règles du jeu en pressant deux boutons simultanément ? Dans le testeur de télépathie, un circuit XOR était utile car sa sortie est haute si l'une de ses entrées est haute, alors que l'autre est basse et

le reste si les deux entrées sont au niveau haut. Dans ce cas, la sortie haute d'un XOR indiquait qu'un joueur avait choisi et n'avait pas triché.

Mais les portes XOR sont généralement limitées à deux entrées. Or, dans le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux, trois boutons-poussoir sont nécessaires pour chaque joueur. Nous avons donc un problème !

S'en remettre à la logique aide toujours. Annabelle triche si AP ET (AND) AF sont pressés simultanément, OU (OR) si AF ET (AND) AC sont appuyés, OU (OR) si AC ET (AND) AP le sont. (Elle triche également si elle active ses trois boutons mais il n'est pas utile de considérer ce test car cela implique d'abord d'appuyer sur deux boutons, ce qui est déjà vérifié pour chaque combinaison.)

Toute tricherie doit allumer un indicateur d'alarme et empêcher une décision de fin de jeu. La même situation doit être traitée si Boris triche. En d'autres termes, si Annabelle triche, OU (OR) si Boris triche l'indicateur de victoire ou de match nul doit être inactivé.

Il est certainement possible de réaliser cette fonction. Nous avons simplement besoin de trois portes AND additionnelles pour chaque joueur afin de tester chaque paire de boutons-poussoir ; une porte OR pour la sortie des circuits AND ; une porte NOR qui génère une sortie haute uniquement si les deux joueurs ne trichent pas ; et finalement, la porte NOR est reliée à une autre porte AND pour chaque condition de fin de jeu. Mais tout cela ne semble pas facile à construire.

Fondamentaux : les réseaux de portes logiques

Dès le début des années 1970, les fabricants de circuits commercialisent des circuits intégrés contenant des réseaux de portes logiques programmables. Toutes les réalisations avaient le même objectif de permettre la programmation d'un réseau de portes « générique », d'être programmé par des liaisons spécifiques à chaque application afin de créer un circuit intégré personnalisé. De nombreuses méthodes ont été mises au point pour y parvenir, dans des composants tels que les PLA, PAL, GAL et CPLD (vous en trouverez la description sur Internet si cela vous intéresse). Finalement, les composants FPGA (Field Programmable Gate Arrays ou « Réseau de portes programmables par l'utilisateur ») ont été développés. Ils ne contiennent que des portes logiques mais offrent des possibilités de programmation plus sophistiquées pour l'utilisateur.

Malheureusement, programmer un FPGA nécessite l'utilisation d'un langage de programmation spécifique (en général sous licence du fabricant) ainsi qu'un matériel approprié. Ce n'est pas le genre de moyens que l'on trouve habituellement dans son atelier personnel aussi en resterons-nous aux moyens traditionnels et aux circuits intégrés classiques.

Où en sommes-nous ? J'aurais réellement préféré une solution plus simple qu'un diagramme logique avec autant de portes qui ne peut pas tenir sur une seule page – et, par chance, cette possibilité existe.

Place aux interrupteurs

La fig. 18-1 page suivante introduit un nouveau concept. Elle montre comment chaque porte logique peut être remplacée par une paire d'interrupteurs ordinaires, chaque interrupteur pouvant être considéré comme l'entrée de la porte.

Quand un bouton-poussoir est pressé, cela équivaut à l'entrée d'une porte étant au niveau haut. Lorsqu'il n'est pas activé, cela correspond à une entrée au niveau bas. Ainsi, dans cette illustration, la paire d'interrupteurs du haut ne délivre une sortie haute que si l'interrupteur de gauche ET (AND) celui de droite sont appuyés. Exactement comme une porte AND !

Enfin, pas tout à fait. La sortie d'une porte AND est soit haute, soit basse. Quand les interrupteurs sont ouverts sur la fig. 18-1, la sortie est un circuit ouvert. Elle sera donc flottante, sans niveau défini. Il faut donc ajouter une résistance de rappel vers la masse pour contrôler le niveau de chaque sortie flottante. J'ai omis ces résistances par simplicité.

Il existe une autre différence plus importante entre une porte logique et une paire d'interrupteurs : les interrupteurs conduisent l'électricité dans les deux sens alors qu'une porte logique ne le fait pas. Vous ne pouvez pas injecter un courant dans la sortie d'une porte logique et le retrouver à l'entrée. Cette différence pourrait vous provoquer de nouveaux maux de tête, mais cela peut aussi être un moyen de simplifier les choses.

Fondamentaux : une porte XNOR faite d'interrupteurs d'éclairage

Permettez-moi une petite digression – savez-vous que votre logement comporte probablement une porte XNOR dans le câblage électrique de son éclairage ? C'est le cas si, par exemple, vous avez un escalier. Deux interrupteurs, l'un placé en bas et l'autre en haut de l'escalier, peuvent indifféremment éteindre la lumière, mais aussi l'allumer si elle est éteinte.

Vérifiez la logique sur la fig. 18-1. Imaginez comment le courant circule dans chaque configuration d'interrupteurs et comment il circule lorsque l'un des interrupteurs change de position.

Pouvez-vous imaginer un circuit logique ayant les mêmes fonctions mais avec trois interrupteurs ? En fait chacun doit pouvoir inverser l'état de l'éclairage. Je vous donne un indice ; l'interrupteur du milieu devra posséder deux pôles.

Revenez au jeu

Observez la fig. 18-2 et comparez-la avec la fig. 17-1. Elles représentent toutes les deux les mêmes fonctionnalités mais la nouvelle version ne nécessite aucune porte logique. Chaque paire d'interrupteurs qui crée une condition gagnante pour le joueur A est câblé en série ce qui revient à les relier aux deux entrées d'une porte AND. Les trois paires sont ensuite reliées ensemble ce qui équivaut à les relier aux entrées d'une porte OR.

Si vous vous demandez pourquoi j'utilise maintenant des interrupteurs plutôt que des boutons-poussoir, c'est pour faire évoluer le circuit en utilisant des interrupteurs multipolaires, bidirectionnels et que de tels interrupteurs existent. En revanche, ils sont plus diffi-

ciles à représenter dans un schéma et prennent plus de place. Imaginez simplement que les interrupteurs sont maintenus par un ressort qui les remet en position ouverte lorsqu'ils ne sont pas appuyés.

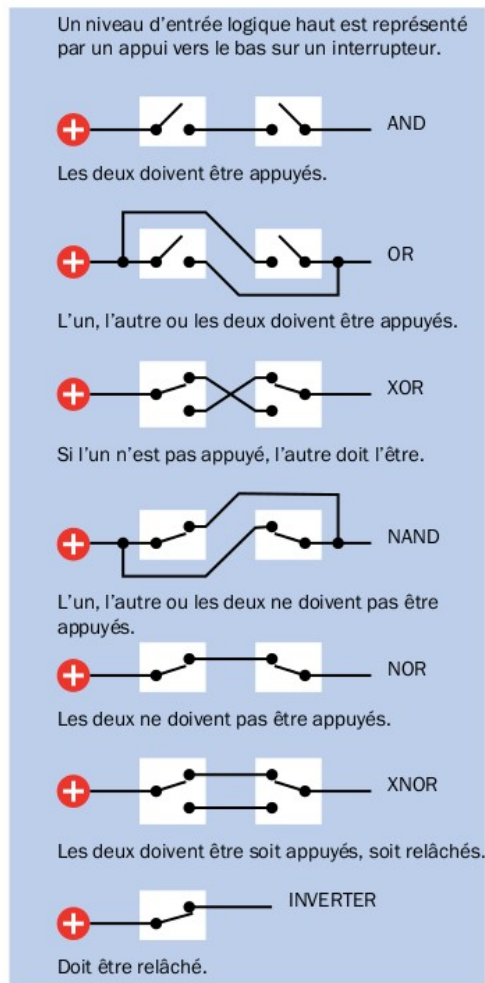


Figure 18-1. Chacun des interrupteurs se comporte comme l'entrée d'une porte logique si l'appui sur l'interrupteur est assimilé à un niveau haut. Pour éviter à la sortie d'être flottante quand les interrupteurs sont ouverts, une résistance de rappel vers la masse peut être ajoutée.

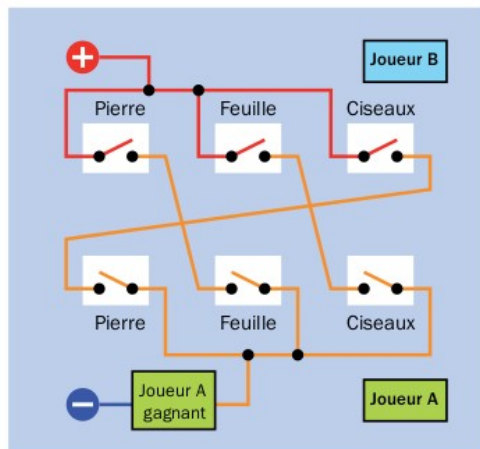


Figure 18-2. Circuit n'utilisant que des interrupteurs, capable de générer une condition gagnante pour chacune des combinaisons favorisant le joueur A du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux. La couleur des liaisons favorise la clarté, cela pourrait être la couleur de leurs gaines isolantes.

Les liaisons sur la fig. 18-2 sont colorées pour davantage de clarté car d'autres fils seront ajoutés dans les étapes suivantes. Ces couleurs pourraient être celles de leurs gaines isolantes.

Sur la fig. 18-3, observez les liaisons logiques entre les interrupteurs lorsque le joueur B gagne. Pouvons-nous combiner les deux circuits ? Nous ne pouvons pas relier la sortie de chacun des interrupteurs à d'autres interrupteurs comme nous avons, précédemment, relié chaque bouton-poussoir à plusieurs portes logiques. Les liaisons électriques permettraient au courant de circuler en boucle, produisant ainsi des résultats erronés. Nous devons utiliser des interrupteurs multipolaires afin de maintenir chaque circuit séparé comme cela est montré sur la fig. 18-4.

Ce circuit nécessite des interrupteurs bipolaires mais, comme j'ai l'intention d'ajouter d'autres fonctions, des contacts supplémentaires seront nécessaires. Heureusement, des boutons-poussoir et des poussoirs à verrouillage (un appui ferme le contact, l'appui suivant l'ouvre) existent en versions ayant deux, quatre, six ou même huit pôles. (Ils sont fréquemment utilisés dans les chaînes stéréophoniques d'entrée de gamme.)

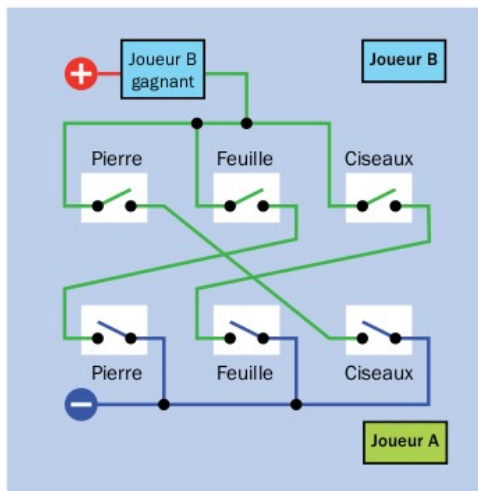


Figure 18-3. Circuit n'utilisant que des interrupteurs, capable de générer une condition gagnante pour chacune des combinaisons favorisant le joueur B du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux.

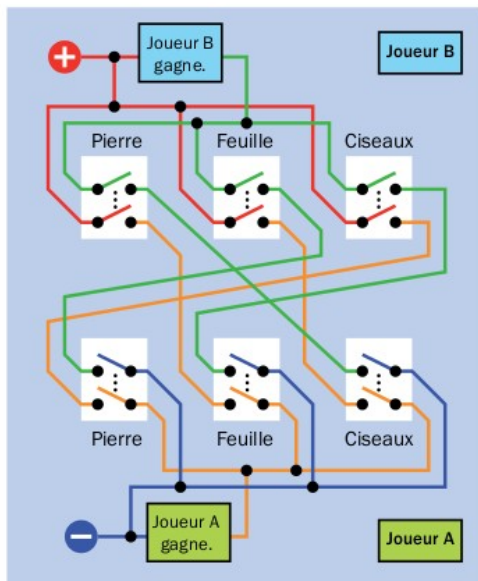


Figure 18-4. En combinant les deux schémas précédents, des interrupteurs bipolaires sont nécessaires pour maintenir les deux circuits électriquement isolés.

Identifiez l'interrupteur

Dans l'expérience 17, je me plaignais d'avoir des maux de tête en tentant de tout réaliser à l'aide de portes logiques. C'était juste après vous avoir présenté le diagramme logique de la fig. 17-3 qui permettait d'allumer une LED à côté de chaque bouton-poussoir activé, mais uniquement après que chaque joueur a actionné son bouton-poussoir.

Existe-t-il une façon plus simple d'y parvenir avec des fils plutôt qu'avec des portes logiques ? Je pense que oui. La fig. 18-5 vous montre comment.

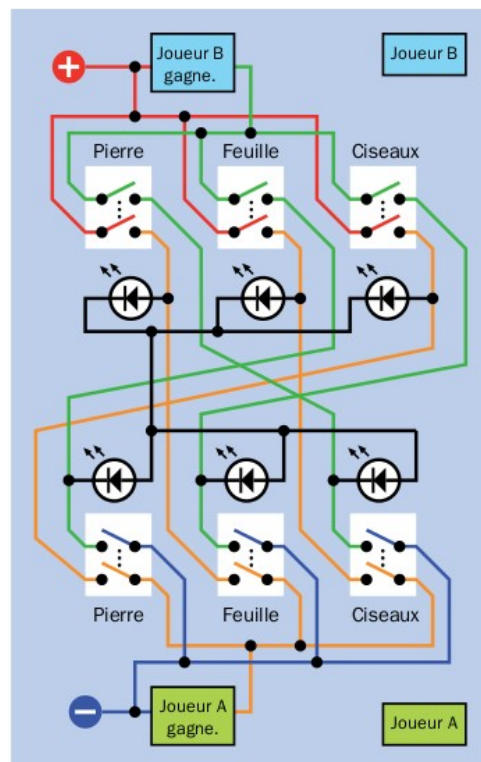


Figure 18-5. Cette configuration commande une LED pour indiquer quel interrupteur a été appuyé mais seulement après que les deux joueurs ont fait leur choix.

Ayant disposé le pôle positif de l'alimentation en haut pour le joueur B et la masse (pôle négatif) en bas pour le joueur A, les diodes LED peuvent être placées au milieu du schéma.

La fig. 18-6 illustre le fonctionnement de ce circuit lorsque le joueur B presse l'interrupteur Pierre tandis que le joueur A appuie sur Ciseaux. Les liaisons reliées au pôle positif sont représentées en rouge et celles vers la masse en bleu. Les fils, interrupteurs, LED et indicateurs inactifs sont grisés. Les fils violets sont parcourus par une intensité réduite passant à travers une diode LED sans traverser une seconde LED.

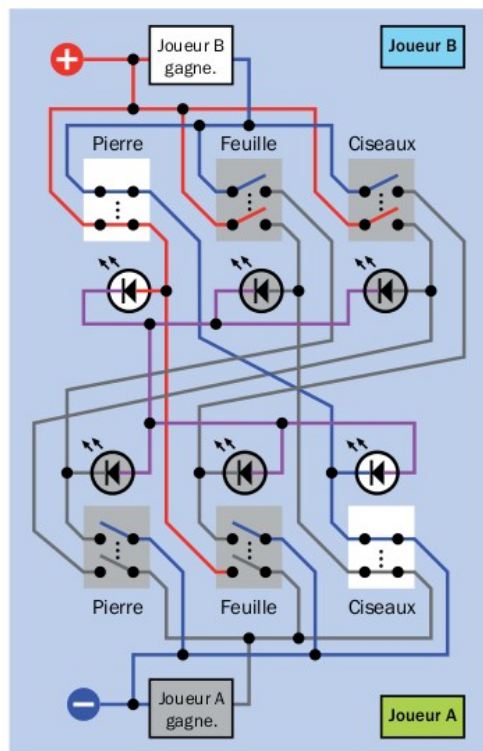


Figure 18-6. Cet exemple montre comment deux interrupteurs allument les LED correspondantes, le joueur B ayant choisi Pierre alors que le joueur A a préféré Ciseaux.

Un élément doit être relié au pôle positif d'un côté et au pôle négatif (masse) de l'autre pour être activé. Ainsi l'indicateur « Joueur B gagnant » est allumé quand l'indi-

cateur « Joueur A gagnant » ne l'est pas. Le courant doit traverser une LED pour atteindre une seconde LED. Les fils entre les LED sont en violet car ils ont une tension intermédiaire. Si vous considérez deux LED en série, reliées d'un côté au pôle positif et de l'autre à la masse, vous comprendrez pourquoi les deux LED placées à côté des interrupteurs activés sont allumées. Rappelez-vous que les LED sont avant tout des diodes, elles bloquent donc les tensions n'ayant pas la bonne polarité.

Si vous considérez les autres combinaisons des interrupteurs, je pense que vous trouverez que chacune d'entre elles allume correctement les LED et les indicateurs qui leur sont connectés.

Dans un circuit réel, si vous reliez deux LED en série qui ont chacune leur propre résistance, vous trouverez peut-être que leur luminosité est trop faible, en raison du courant qui circule à travers deux LED et deux résistances. Essayez d'utiliser deux LED ordinaires câblées sans résistance en série et votre multimètre pour vérifier que le courant est inférieur au maximum spécifié. Plus vraisemblablement, pour obtenir des performances optimales, vous devrez utiliser deux LED ordinaires et une résistance de faible valeur remplaçant le fil violet à gauche du schéma, reliant ainsi les deux groupes de LED. Choisissez une valeur de résistance par essais successifs à partir de 220 Ω en la diminuant jusqu'à obtenir une intensité correcte. Rappelez-vous que la plupart des LED acceptent une intensité de 20 mA, certaines ont une limite inférieure.

Prévenez la tricherie

Voici maintenant la partie difficile : la prévention de la tricherie. Pour cela, j'ai choisi d'utiliser le circuit existant avec une configuration supplémentaire d'interrupteurs qui vérifie la présence de courant dans le circuit de chaque joueur.

Le principe est exposé sur la fig. 18-7 où trois interrupteurs bipolaires sont représentés selon différentes combinaisons. Notez que ces interrupteurs sont normalement fermés. Le fait d'appuyer sur l'un d'eux ouvre ses contacts. Pour attirer votre attention, j'ai coloré chaque interrupteur en vert s'il est pressé, contacts ouverts.

En haut, aucun des interrupteurs n'étant pressé, ils restent tous fermés et l'électricité passe. Dans les trois exemples suivants en partant du haut, un seul interrupteur est activé, les autres restent fermés offrant un seul chemin pour le passage du courant.

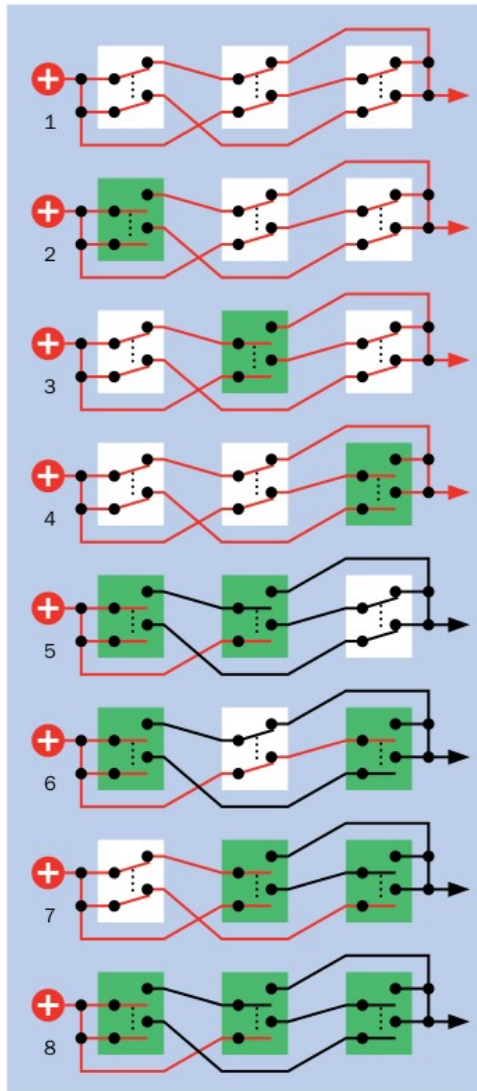


Figure 18-7. Ainsi câblés, trois interrupteurs bipolaires normalement fermés permettront au courant de circuler si aucun ou si un seul interrupteur est appuyé. Le courant sera bloqué si deux ou trois interrupteurs sont pressés. La couleur verte identifie les interrupteurs activés.

Dans les trois exemples suivants, deux interrupteurs sont activés (identifiés par la couleur verte), mais le troisième ne l'est pas, ce qui n'autorise pas le passage du courant. Dans le dernier exemple, les trois interrupteurs sont actionnés, le courant est bloqué. Les fils transportant le courant sont colorés en rouge. Vous constatez que le courant circule seulement si aucun interrupteur ou si l'un d'eux uniquement est activé. En revanche, si l'on appuie sur deux d'entre eux, voire sur les trois, le courant est bloqué. Ce système antitriche peut être utilisé dans notre jeu Pierre, Feuille, Ciseaux.

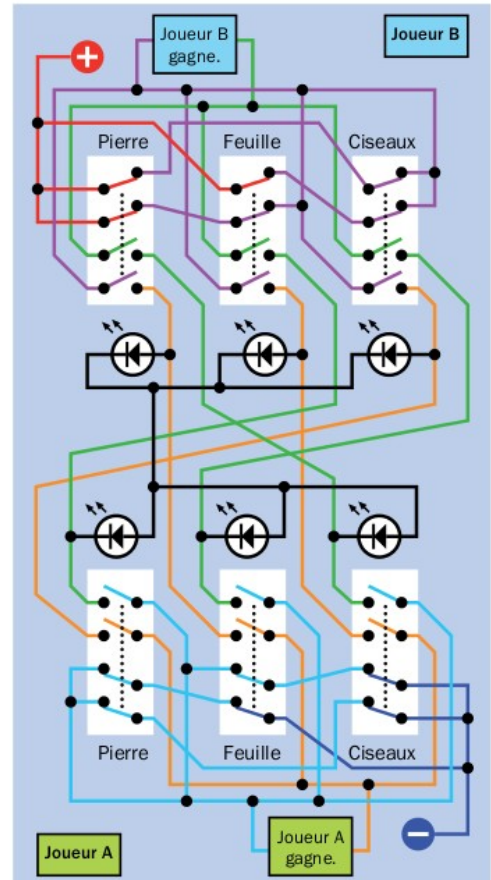


Figure 18-8. Le circuit précédent a été complété pour inclure le système antitriche tel que le courant est interrompu si l'un des joueurs appuie sur deux ou trois interrupteurs simultanément, au lieu d'un seul.

Sur la fig. 18-8 page précédente, le système antiriche a été ajouté au circuit précédent en utilisant deux pôles supplémentaires sur chaque interrupteur. Dans un souci de clarté, je n'ai représenté que les contacts utilisés dans le circuit, pas ceux inutilisés. Ainsi, chaque interrupteur comporte deux contacts normalement ouverts et deux contacts normalement fermés.

J'ai essayé d'être clair en utilisant des liaisons colorées. Tout fil relié en permanence au pôle positif de l'alimentation est rouge. Les liaisons véhiculant le pôle positif au travers des interrupteurs normalement fermés sont colorées en violet. Si deux ou trois interrupteurs sont appuyés simultanément, les fils violets ne transportent plus la tension positive.

De façon similaire, en bas du circuit, les fils bleu foncé sont reliés en permanence à la masse, alors que les fils bleu clair (cyan) ne le sont plus si deux ou trois interrupteurs sont appuyés.

De cette manière le système coupe l'alimentation du circuit si l'un des joueurs triche.

Match nul

Pour finir, avons-nous besoin d'un signal audible quand Annabelle et Boris font match nul en appuyant sur deux boutons en face l'un de l'autre ? Ils s'en apercevront à la vue des LED associées aux interrupteurs. Si vous souhaitez un signal sonore, intégrez-le. Pour cela, sans ajouter un contact supplémentaire, il vous faut trois buzzers, qui heureusement sont très peu coûteux (parfois moins d'un euro). Intégrez-les à votre circuit comme indiqué sur la fig. 18-9. Les symboles circulaires sont les buzzers. Ils doivent être de type polarisé, laissant passer le courant dans un seul sens et émettre un son lorsqu'ils sont alimentés par une tension continue. N'utilisez pas de haut-parleur ou de type de buzzer nécessitant d'être alimenté par un signal alternatif audible.

Pourquoi faut-il plus d'un seul buzzer ? Si vous n'en aviez qu'un, vous devriez relier trois fils depuis chacune de ses extrémités vers le contact existant de chaque interrupteur, et le courant passerait par un fil, puis sur chacun des autres fils. En conséquence, n'importe quelle paire d'interrupteurs actionnés ferait retentir le buzzer.

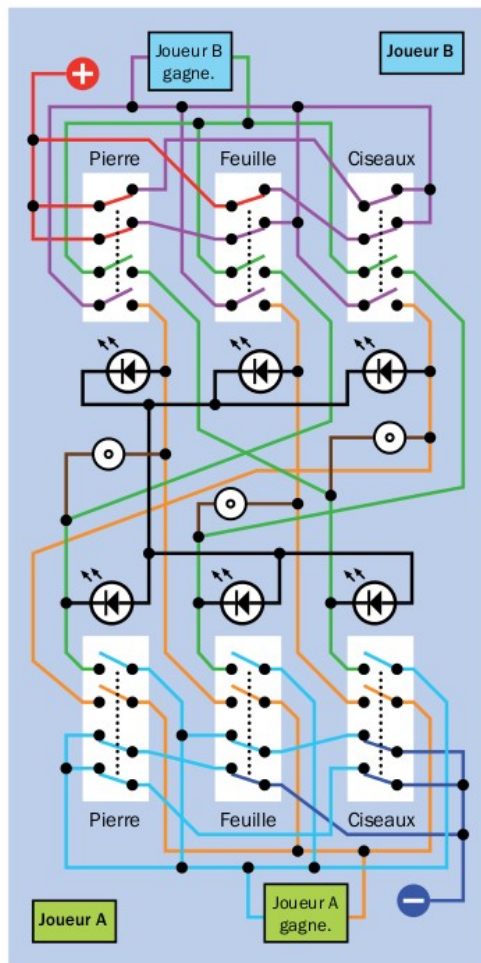


Figure 18-9. Chaque buzzer (identifié par un symbole comportant deux cercles concentriques) retentira si les deux interrupteurs auxquels il est relié sont enfoncés, indiquant un coup nul.

Câblage

Pour réaliser ce circuit, vous devez effectuer un câblage en soudant des fils. L'espacement entre les broches des interrupteurs sera sans doute de 2,54 mm mais si vous insérez un tel interrupteur sur une plaque de montage, chaque rangée de broches finira au niveau des conduc-

teurs latéraux de la platine empêchant de les relier séparément. Les interrupteurs que j'ai trouvés sont plus étroits que les circuits intégrés et, de ce fait, ils ne peuvent pas chevaucher l'espace central entre les deux rangées de trous de la plaque.

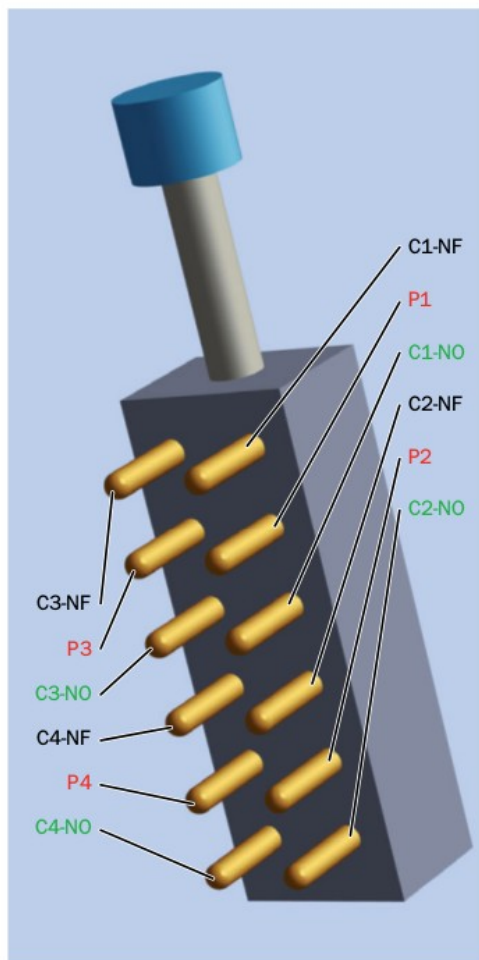


Figure 18-10. Brochage d'un interrupteur à glissière de type 4PDT. Les points communs sont nommés P1 à P4 et les contacts sont numérotés de C1 à C4. Les contacts normalement fermés sont identifiés par les lettres NF et les contacts normalement ouverts par les lettres NO.

La fig. 18-10 représente un interrupteur de type 4PDT à bouton-poussoir. Les labels rouges révèlent les points communs des contacts de l'interrupteur, les quatre jeux de contact en relation avec les points communs sont repérés C1, C2, C3 et C4, NF indiquant un contact normalement fermé et NO un contact normalement ouvert. Que vous choisissiez un interrupteur à action momentanée ou un type à verrouillage, ces modèles sont souvent appelés « interrupteurs à glissière » parce que leurs contacts internes sont des glissières.

La fig. 18-11 montre deux symboles typiques représentant un interrupteur 4PDT. Les labels correspondent à ceux de la représentation en 3D de l'interrupteur. Du côté droit, la barre verticale grise est en matière isolante avec des segments conducteurs représentés en noir. Les pièces noires court-circuitent les contacts adjacents. Quand la barre est déplacée vers le bas par le bouton-poussoir, elle relie une paire de contacts différents. Vous rencontrerez l'un ou l'autre de ces symboles dans les fiches techniques des fabricants.

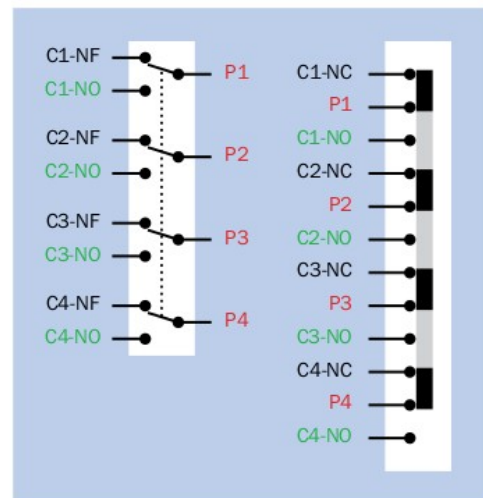


Figure 18-11. Deux symboles usuels utilisés dans les schémas pour représenter un interrupteur à glissière 4PDT.

La fig. 18-12 page suivante explique comment relier les interrupteurs pour réaliser le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux. Les broches qui ont des liaisons soudées sont représentées en noir alors que les broches libres sont en blanc. Quelques fils ont été déplacés par rapport au schéma précédent dans le but de minimiser les croisements et

éviter de devoir relier trois fils sur la même broche, plus difficiles à souder.

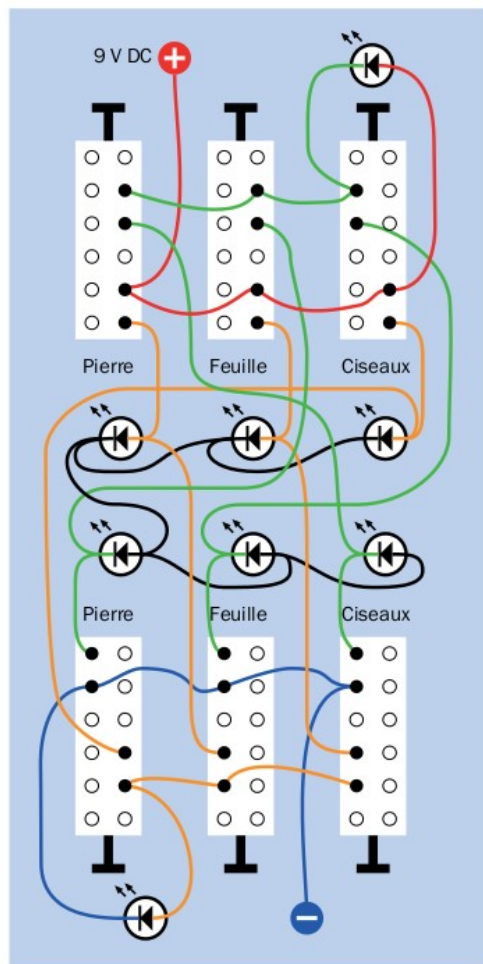


Figure 18-12 : Câblage de six interrupteurs à glissière de type 4PDT correspondants à la version simplifiée du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux, ne comprenant pas le système de prévention de tricherie ni les résistances en série avec les LED.

Il manque à ce circuit le système de détection de tricherie afin que vous ayez un câblage plus simple, au moins au début. Les couleurs des fils correspondent aux couleurs utilisées dans le schéma mais, bien entendu

n'importe quelle couleur conviendra. Remarquez que la position des interrupteurs du bas est inversée par rapport à celle des interrupteurs du haut. C'est pour que vous puissiez les monter sur les côtés opposés d'un coffret ou d'une platine de montage auquel cas, les interrupteurs doivent être tournés les uns par rapport aux autres.

La soudure des fils sur les interrupteurs requiert quelques précautions afin d'éviter de former des ponts de soudure qui provoqueraient des courts-circuits. Je pense qu'il serait plus aisé d'utiliser du fil plus fin que le fil de section 0,2 mm² que je vous ai recommandé pour les réalisations sur plaque de montage.

Personnellement, je préfère des câbles ruban multicolores que l'on peut séparer en simples conducteurs colorés. Ces fils sont flexibles, ce qui rend le câblage facile bien que le résultat final paraisse un peu désordonné.

La fig. 18-13 montre le dessous d'une plaque que j'ai soudée moi-même. Mes soudures ne sont pas des plus belles mais le but est de réaliser un circuit qui fonctionne et c'est le cas ici.

J'ai utilisé des diodes LED 12 V possédant leur propre résistance série, c'est pourquoi aucune résistance n'apparaît dans le câblage. J'ai constaté avec plaisir que leur luminosité était suffisante bien que le courant traverse les deux LED et les deux résistances.

La face supérieure de la plaque perforée est présentée sur la fig. 18-14. J'ai laissé les LED avec leur fils non coupés car l'idée est de les insérer dans des trous percés dans le couvercle du coffret, les boutons-poussoir étant, quant à eux, accessibles par des trous aménagés sur les côtés du coffret. À l'heure où j'écris ce livre, je n'ai pas encore pris le temps de réaliser ce coffret. Les LED rouges indiquent quel interrupteur a été activé, les LED d'apparence grise s'illuminent en bleu pour révéler le joueur qui remporte le coup.

Je recommande une alimentation de 9 V DC pour ce projet qui n'utilise aucun courant tant qu'un bouton n'est pas enfoncé, et les LED consommeront également très peu. Par ailleurs, les LED prévues pour 12 V DC brilleront suffisamment avec une pile de 9 V.

Si vous choisissez des LED ordinaires nécessitant une résistance série, préférez des résistances de 470 Ω pour les LED qui indiquent le gagnant.

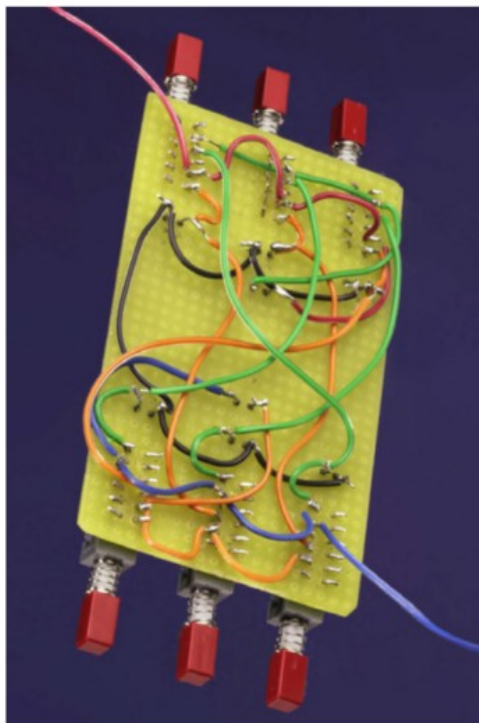


Figure 18-13. Dessous d'une plaque perforée rectangulaire montrant les interrupteurs à glissière sans le système antitriche.

En revanche, je n'ai pas déterminé la valeur à utiliser pour les autres LED. Si vous réduisez les résistances en série pour renforcer la luminosité des diodes LED, faites attention de ne pas dépasser le courant limite recommandé dans leur fiche technique.

Une version du jeu réalisée avec deux morceaux de plaque perforée placés face à face pour constituer les côtés d'un boîtier surmonté d'un couvercle recevant les LED est illustrée sur la fig. 18-15. Cette configuration cache à chaque joueur les boutons-poussoir de l'autre. La pile de 9 V est visible à l'intérieur de la boîte, maintenue par une pièce en plastique. Son remplacement nécessite de retirer quelques vis, mais la pile devrait durer environ deux ans si le jeu n'est pas utilisé trop souvent.

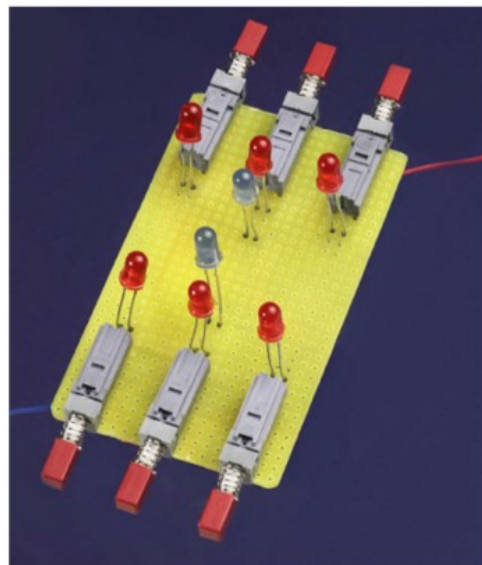


Figure 18-14. Face supérieure du circuit du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux. Les fils des LED n'ont pas été raccourcis afin de pouvoir les insérer dans les trous du couvercle d'un coffret.

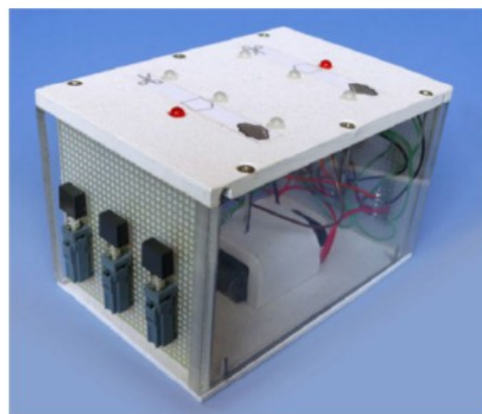


Figure 18-15. Version finale du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux n'utilisant que des interrupteurs.

Câblage antitriche

La fig. 18-16 présente le câblage des interrupteurs comprenant la fonction préventive de tricherie. Il est agréable de profiter de cette fonction qui n'augmente pas trop le temps de réalisation. Si vous avez déjà réalisé la version sans le dispositif antitriche, les seuls fils que vous devrez modifier sont les fils bleus et rouges qui alimentent le circuit. Tout le reste est ajouté. Si vous voulez également les buzzers, je vous laisse les intégrer.

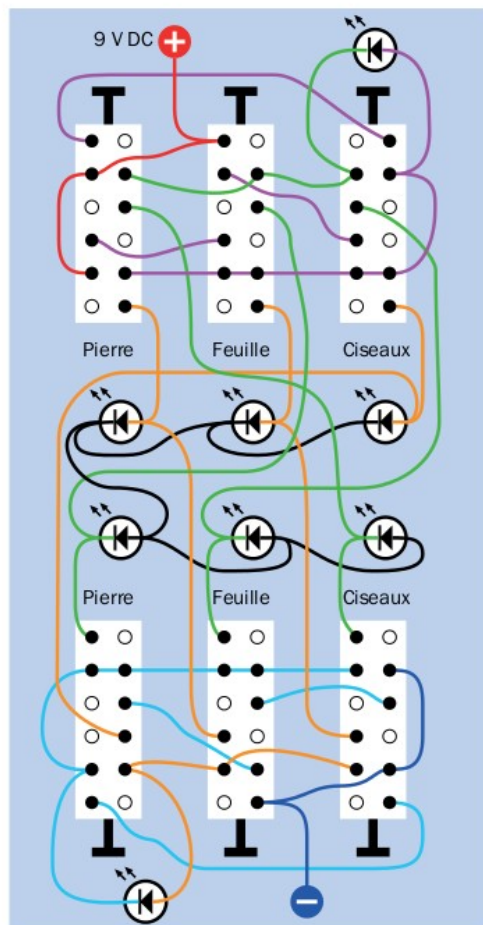


Figure 18-16. Schéma de câblage de la version améliorée du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux comprenant la prévention de tricherie.

Le dessous de la plaque perforée comprenant le système de prévention de la tricherie est représenté sur la fig. 18-17.

Conclusion

Pour débiter, les interrupteurs sont apparus plus simples que les portes logiques, mais finalement, ils sont devenus compliqués à plus d'un titre.

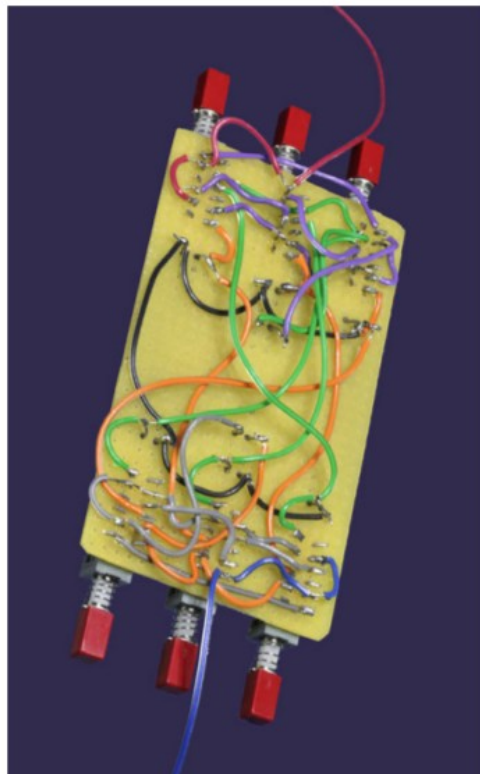


Figure 18-17. Vue du circuit précédent auquel on a ajouté le système antitriche.

Les portes logiques peuvent être employées d'une manière très logique. Vous écrivez ce que vous souhaitez en utilisant des ET (AND) et des OU (OR), puis vous le représentez dans un diagramme logique avec des portes AND et OR (et d'autres portes si nécessaire). Vous terminez en choisissant les circuits intégrés conte-

nant les portes adéquates, puis vous les reliez ensemble selon le diagramme que vous avez tracé. Tout cela n'est pas très difficile.

L'inconvénient des portes logiques est qu'elles ne sont pas très sophistiquées, si bien que vous devez en utiliser un grand nombre. De ce fait, le circuit nécessite beaucoup de circuits intégrés, ce qui prête à confusion et facilite les erreurs de câblage.

Les interrupteurs ont plusieurs avantages. Ils sont simples, faciles à comprendre, n'ont pas besoin d'énergie quand leurs contacts sont ouverts et ils peuvent véhiculer une puissance (relativement) importante quand ils sont fermés. J'aime assez l'idée d'un circuit qui ne nécessite pas d'interrupteur marche-arrêt puisque les interrupteurs *constituent* le circuit !

Les problèmes apparaissent quand on souhaite que le circuit réalise plusieurs fonctions. Cela impose inévitablement l'utilisation d'interrupteurs multipolaires et l'enchevêtrement des fils qui en résulte peut entraîner des conséquences imprévisibles, à moins que vous ne soyez très minutieux. Si vous devez optimiser le circuit, soyez encore plus prudent.

Le plus problématique est que vous devez avoir une sorte de don intuitif et inhabituel pour concevoir un circuit uniquement composé d'interrupteurs. Il n'y a pas d'équivalent au processus logique permettant de passer de la description verbale au circuit utilisant des portes AND et OR. Il est très rare que quelqu'un essaie

de réaliser un circuit utile ne comportant que des interrupteurs. J'ai réalisé celui-ci uniquement pour que vous vous fassiez une idée de ce que cela implique.

Existe-t-il d'autres options que des portes logiques ou des interrupteurs ? Absolument ! Il y a trois possibilités.

1. Vous pouvez utiliser des relais. Voilà bien longtemps, les centraux téléphoniques étaient entièrement réalisés avec des relais. Vous considérez qu'un système n'utilisant que des relais peut être comparé à un système utilisant des transistors car ces composants ont un comportement similaire. N'oubliez pas cependant qu'un relais peut avoir plusieurs pôles comme un interrupteur, permettant à un signal d'entrée de stimuler plusieurs sorties séparées.
2. Vous pouvez introduire un décodeur que j'ai évoqué précédemment. Il contient un grand nombre de portes précâblées vous évitant de devoir les considérer une par une. Je vais d'ailleurs utiliser des décodeurs dans les deux prochaines expériences.
3. Une fois encore, vous pouvez utiliser un microcontrôleur. Dans le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux comme dans le « testeur de télépathie », un microcontrôleur permettrait de rendre les choses plus faciles. Mais, comme pour le « testeur de télépathie », vous apprendriez peu sur la logique.

Observez la fig. 19-1 où j'ai redessiné le diagramme logique du testeur de télépathie utilisant un circuit intégré décodeur. Bien que ce circuit intègre maintenant toutes les fonctionnalités décrites précédemment, il n'utilise que trois circuits intégrés. Un circuit ne peut pas être plus simple que cela.

Test du décodeur

Voyons, quel composant mystérieux rend l'ensemble aussi simple ? Avant de réaliser ce circuit, commençons par un test sur table du décodeur. Je conseille le 74HC4514. Je préconise également un circuit de la famille HC car, chaque fois que j'achète un circuit intégré, je pense que je pourrai le réutiliser à d'autres fins dans le futur pour allumer des LED (au moins à titre de test du circuit). Rappelez-vous que la série des circuits intégrés 74HC00 peut fournir ou absorber une intensité de 20 MA alors qu'un circuit de la série 4000 est beaucoup plus limité.

Le circuit intégré 74HC4514 est cependant assez cher (parfois de l'ordre de 3 €), mais la version CMOS ancienne identifiée 4514 est plus courante et moins chère. Pour cette expérience, le décodeur ne devant pas piloter de LED, n'importe quelle version de ce circuit peut convenir. Elles ont toutes le même brochage illustré sur la fig. 19-2 page suivante.

Connectez le circuit tel qu'indiqué sur la fig. 19-4 page suivante. En haut du schéma, je spécifie des interrupteurs plutôt que des boutons-poussoir car il serait peu pratique de devoir appuyer simultanément sur plusieurs boutons pour effectuer le test. Bien entendu, des interrupteurs ou des boutons-poussoir assureront le fonctionnement. La version sur plaque de montage est représentée sur la fig. 19-3 page suivante.

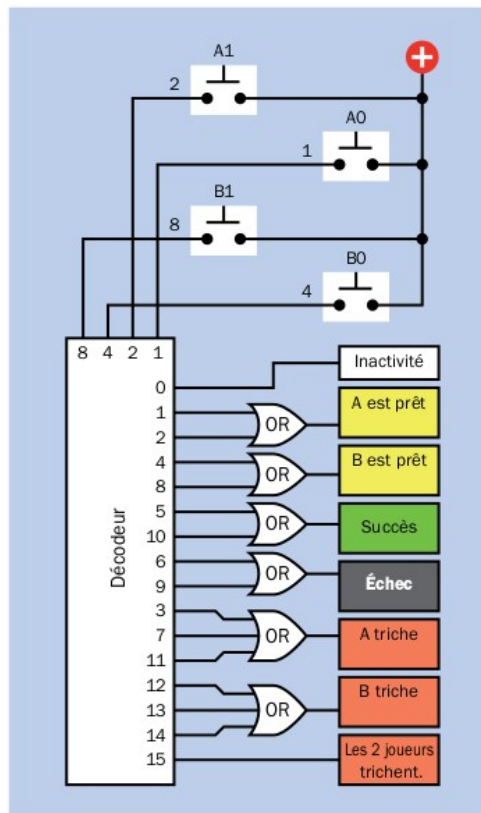


Figure 19-1. En utilisant un circuit intégré décodeur, le nombre de portes logiques utilisées dans le testeur de télépathie a largement diminué. Les broches de connexion ont été réorganisées pour réduire le nombre de croisements sur le diagramme.

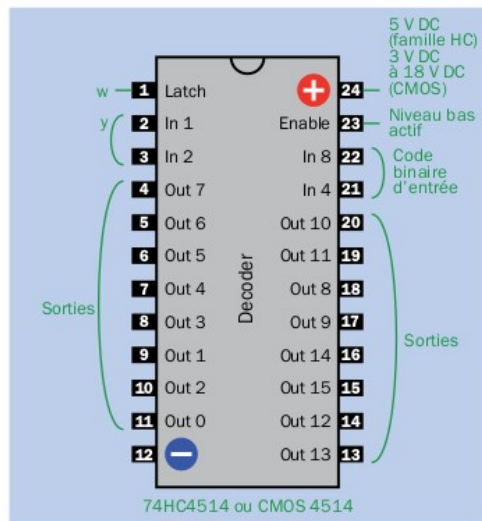


Figure 19-2. Brochage du circuit intégré décodeur permettant de simplifier le projet du testeur de télépathie.

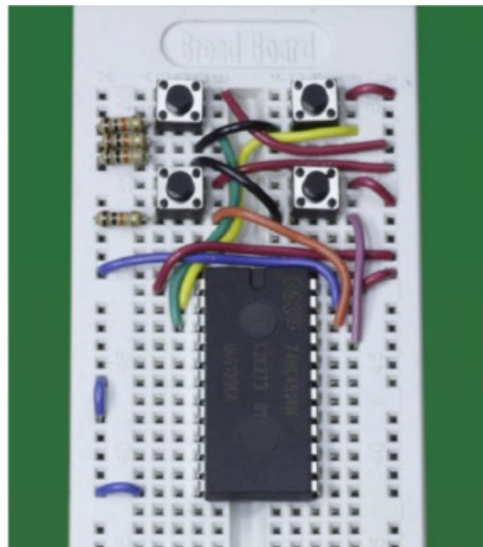


Figure 19-3. Réalisation pratique du circuit de test du décodeur. Les circuits intégrés décodeurs de certains fabricants pourraient être plus étroits que celui qui est représenté ici mais leur fonctionnement est identique.

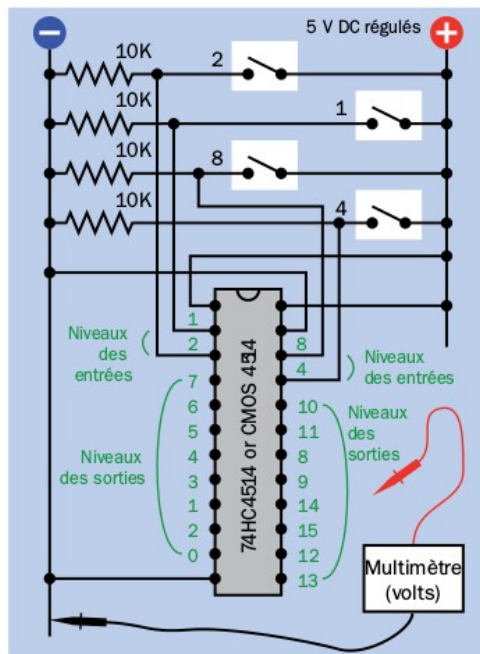


Figure 19-4. Connexions du circuit décodeur pour un test. Le cordon rouge du multimètre peut être relié à n'importe quelle broche libre.

Réglez votre multimètre pour la mesure de volts continus et reliez le cordon noir à la masse à l'aide d'un câble de liaison muni d'un grippage à chaque extrémité ou en équipant votre cordon de mesure d'un mini grippage. Vous utiliserez le cordon de mesure rouge pour sonder les broches de sortie du décodeur indiquées sur le schéma.

Comme le circuit réalise des opérations mathématiques simples, chacune de ses broches se voit attribuer une valeur. Les broches d'entrée ont pour valeur 1, 2, 4 et 8. Ces nombres sont également indiqués sur les interrupteurs qui distribuent les niveaux d'entrée. Les broches de sortie ont une valeur de 1 à 15. Comme vous le remarquez, elles ne sont pas représentées en ordre numérique sur le dessin (ce n'est pas une erreur typographique sur la figure). Pour éviter toute confusion, vous pouvez écrire leurs valeurs sur des étiquettes autocollantes collées près du circuit intégré (si vous écrivez suffisamment petit avec un stylo feutre fin).

Commencez avec tous les interrupteurs ouverts. Mesurez la tension de toutes les sorties du circuit intégré, vous devriez constater que la broche portant la valeur 0 est au niveau haut, les autres étant au niveau bas. Fermez maintenant l'interrupteur 1, la sortie marquée 1 devient haute, les autres étant basses. Fermez maintenant les interrupteurs 1, 2 et 4 simultanément et laissez-les ainsi. Vous constatez alors que la sortie 7 est haute, les autres étant basses.

Le décodeur fonctionne comme une petite machine à additionner. Les valeurs des broches d'entrée maintenues au niveau haut sont additionnées. Le circuit met alors la sortie de valeur correspondante au niveau haut.

Voici ce qu'il faut retenir à ce sujet.

- Les valeurs des entrées 1, 2, 4 et 8 ont été choisies afin que chaque sortie ne puisse être mise au niveau haut que par une seule combinaison des valeurs d'entrée.
- La sortie haute nous indique donc les interrupteurs qui ont été fermés.

Si cela n'est pas complètement clair, observez quatre états possibles du circuit, choisis au hasard, sur la fig. 19-5. J'ai simplifié la figure en montrant les entrées, triées par ordre croissant, en haut du décodeur et les sorties, également triées, à droite du décodeur. Une entrée en rouge indique un niveau haut provoqué par la fermeture de l'interrupteur correspondant, une sortie en rouge indique également un niveau haut. En additionnant les valeurs du haut, vous obtenez la valeur de la sortie qui sera haute.

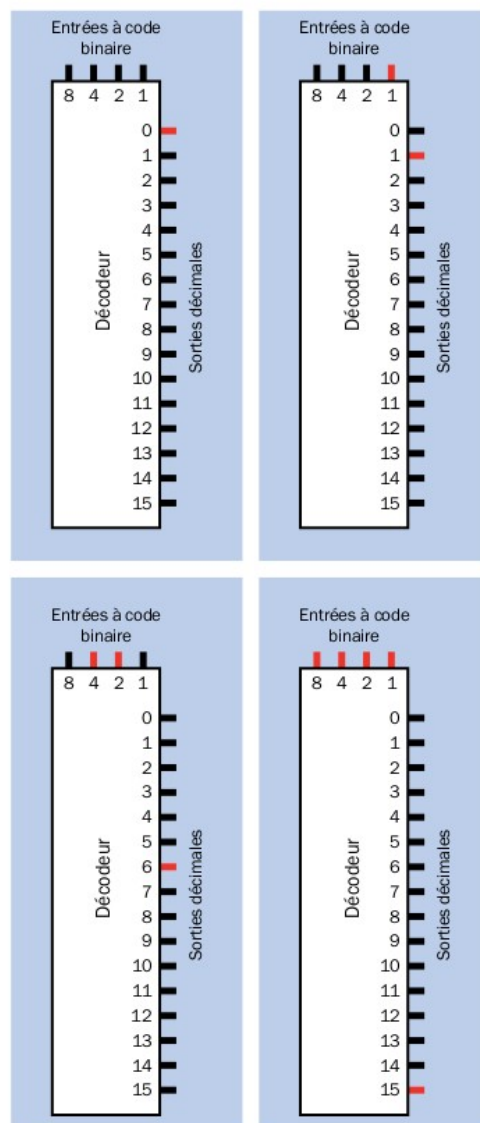


Figure 19-5. Quatre exemples montrant le comportement du circuit décodeur générant une sortie haute (en rouge) sur la broche portant la valeur correspondant à la somme des valeurs des entrées ayant un niveau haut. Pour plus de clarté, les broches du dessin ont été triées selon leur valeur. Les broches du circuit intégré ne sont pas positionnées séquentiellement.

Rappel sur le système binaire

Revenons sur la fig. 19-1. Elle est presque identique au diagramme de la fig. 19-5 ci-contre, à l'exception que j'ai regroupé les valeurs numériques des sorties afin de les aligner correctement avec les portes logiques.

Dans le testeur de télépathie, il est facile de savoir quel bouton-poussoir a été pressé ou non par Boris ou Annabelle. Par exemple, si la sortie de valeur 1 OU (OR) 2 du décodeur est haute, le bouton-poussoir A0 OU (OR) A1 (portant les valeurs 1 OU (OR) 2), est enfoncé, tous les autres boutons-poussoir n'étant pas activés. Dans le testeur de télépathie, cela signifie que A a fait son choix tandis que B ne l'a pas encore fait.

Supposons que la sortie de valeur 6 est maintenant haute. Ceci indique uniquement que les boutons-poussoir A1 et B0 (de valeurs 2 et 4), sont fermés, les autres étant ouverts. De la même façon, si la sortie de valeur 9 est haute, seuls les boutons A0 et B1 (de valeurs 1 et 8) sont appuyés, les autres étant relâchés. Si les broches de sortie de valeur 6 OU (OR) 9 sont au niveau haut, chaque joueur a choisi un bouton-poussoir mais ceux-ci ne sont pas directement opposés, les joueurs A et B ont donc échoué à ce test de télépathie.

Vous pouvez ainsi étudier chaque combinaison et vérifier les sorties.

Sur la fig. 19-1, vous verrez que j'ai intégré un voyant supplémentaire qui informe si les deux joueurs ont triché lorsque les quatre boutons-poussoir sont actionnés. J'ai également ajouté une sortie indiquant quand le circuit est inactif, aucun bouton-poussoir n'étant fermé.

Les entrées du décodeur sont dites « binaires » car chacune de leur valeur est identique à la valeur de chaque position d'une valeur binaire. J'ai évoqué brièvement le codage binaire dans *L'Électronique en pratique*, aussi vais-je seulement présenter un diagramme de référence sur la fig. 19-6 qui montre rapidement la relation entre les nombres binaires et les valeurs des broches du circuit décodeur. C'est un « décodeur » parce qu'il prend un nombre codé en binaire et le décode afin d'activer une seule sortie pouvant être identifiée par un nombre décimal.

Valeurs des entrées					Nombres binaires
8	4	2	1		
Circuit décodeur 4 bits				Valeurs des sorties en notation décimale	
				0	0 0 0 0
				1	0 0 0 1
				2	0 0 1 0
				3	0 0 1 1
				4	0 1 0 0
				5	0 1 0 1
				6	0 1 1 0
				7	0 1 1 1
				8	1 0 0 0
				9	1 0 0 1
				10	1 0 1 0
				11	1 0 1 1
				12	1 1 0 0
				13	1 1 0 1
				14	1 1 1 0
				15	1 1 1 1

Figure 19-6. Les niveaux haut et bas des entrées du décodeur peuvent être comparés aux chiffres 1 et 0 d'un nombre binaire. Les sorties du décodeur ont une valeur équivalente en notation décimale.

Du fait qu'une position binaire est souvent appelée « bit » et comme le décodeur 74HC4514 (ou son ancien cousin le 4514) possède quatre entrées binaires, il est souvent appelé « décodeur 4 bits ». Il est parfois appelé décodeur 4/16, en raison de ses quatre entrées et seize sorties.

Câblage

Le testeur de télépathie est maintenant facile à construire. Son schéma complet est représenté sur la fig. 19-7. Dans ce circuit, vous pouvez utiliser la version du décodeur CMOS plus économique (le 4514), ou le type HC plus cher (le 74HC4514 qui a été développé pour imiter l'ancien 4514 en respectant le même brochage). Notez que le circuit intégré CMOS, plus ancien, ne délivre pas assez de puissance pour piloter une LED directement.

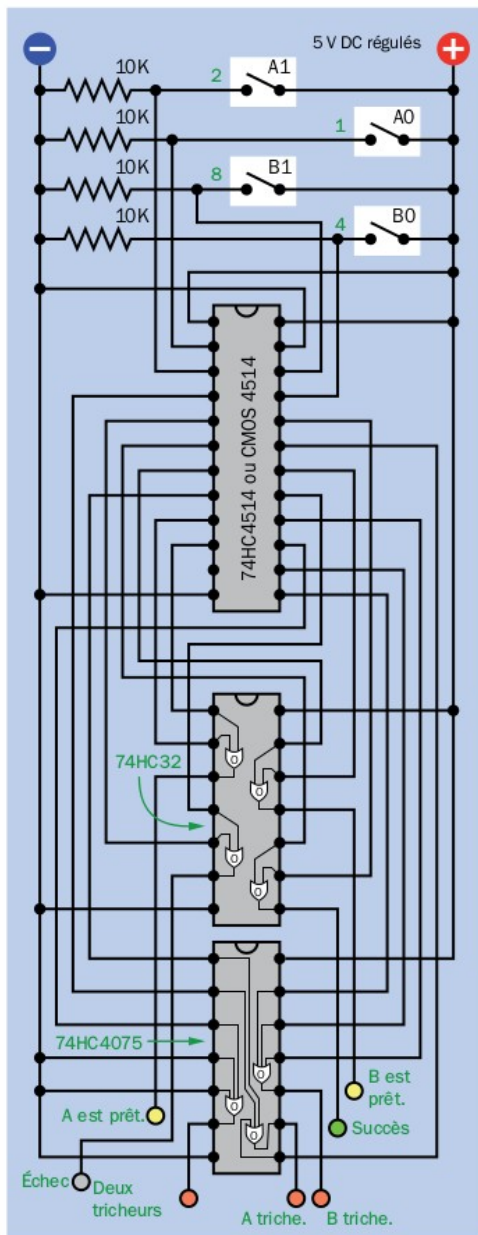


Figure 19-7. Schéma du testeur de télépathie utilisant un circuit décodeur et deux circuits intégrés logiques.

C'est pour cela que j'ai suggéré d'effectuer les mesures du test initial en utilisant un multimètre qui absorbe une intensité négligeable.

Pour ce circuit, vous aurez besoin d'un quadruple OR à deux entrées – le circuit intégré 74HC32 que vous avez déjà employé. Son brochage est rappelé sur la fig. 15-7. L'autre circuit intégré logique nécessaire est un triple OR à trois entrées, le 74HC4075 que vous n'avez pas encore utilisé. Son brochage est indiqué sur la fig. 19-8. Les liaisons internes de ce circuit sont identiques à celles du triple AND à trois entrées montré sur la fig. 16-11. Ils ne sont cependant pas identiques et vous devrez suivre précisément le schéma en réalisant les connexions.

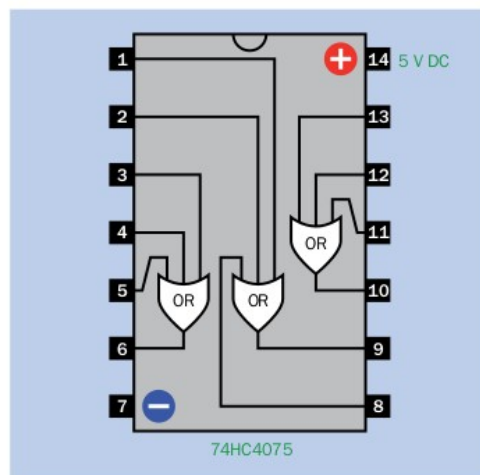


Figure 19-8. Liaisons internes du circuit intégré triple OR à trois entrées 74HC4075.

Si vous revenez à la fig. 19-1, vous observez que pratiquement toutes les sorties du décodeur traversent une porte logique avant de piloter la LED appropriée. Si nous choisissons des circuits de la famille 74HC00, nous disposerons d'assez de puissance pour piloter les LED. En revanche, que se passe-t-il si vous utilisez le décodeur plus économique de la série 4000 ? Les sorties de valeurs 0 et 15 sont connectées directement à un voyant.

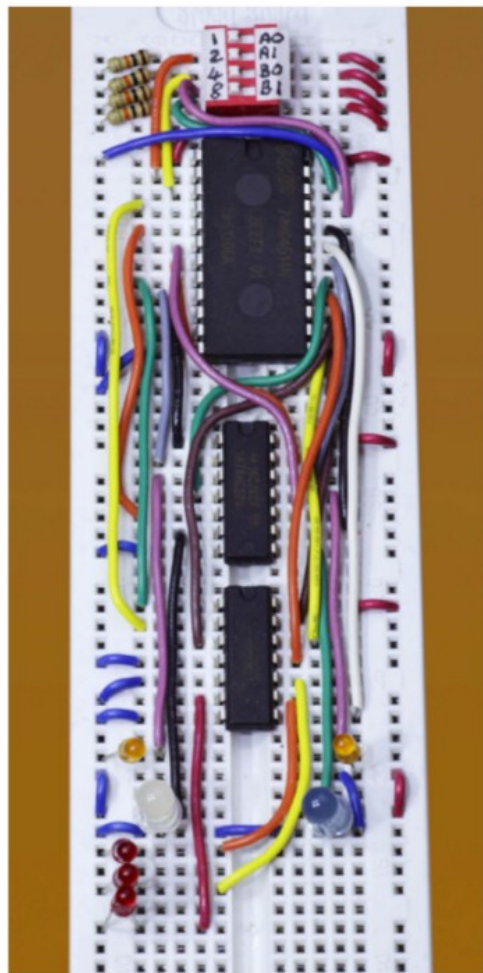


Figure 19-9. Câblage du testeur de télépathie utilisant un circuit décodeur afin de réduire le nombre de circuits intégrés et la complexité du circuit.

Vous pouvez néanmoins vous en sortir en supprimant l'indication « inactivité » connectée à la sortie 0 et en renforçant la sortie 15 « Deux tricheurs » en la faisant passer au travers de la troisième porte OR à trois entrées (non représentées sur la fig. 19-1). Si vous reliez deux des entrées d'une porte triple OR à la masse (niveau bas) et appliquez un signal à la troisième entrée, la porte

logique. OR transmet simplement le signal à sa sortie. Le circuit se comporte donc comme un « tampon » dont la sortie est exactement identique à l'entrée. J'ai représenté l'ensemble sur la fig. 19-7.

Toutes les LED partagent la même résistance série, ce qui est acceptable et suffisant, car une seule LED est illuminée à la fois.

Quand vous mettrez les fils de liaison en place, je suggère que vous imprimiez le schéma de la fig. 19-7 et coloriez chaque liaison après l'avoir établie sur la platine de montage. Cela réduira les risques de commettre des erreurs de câblage qui ont tendance à être habituelles lorsque de multiples conducteurs sont parallèles et proches les uns des autres.

Une version du circuit réalisé sur une plaque de montage est représentée sur la fig. 19-9. Vous y constaterez que le décodeur que j'utilise est une version extralarge de ce circuit intégré. Certaines versions du 74HC4514 sont ainsi, d'autres ont une largeur normale. Leur fonctionnement est cependant identique.

Bien que le composant 4514 puisse fonctionner correctement dans ce projet, évitez de le mélanger avec des circuits intégrés de la famille HC si vous le réutilisez dans de futurs projets.

Brochage du décodeur

Revenons au brochage du 4514 et du 74HC4514 sur la fig. 19-2 : deux systèmes de numérotation y apparaissent. Les nombres en blanc sur fond noir représentent les numéros des broches selon la standardisation valable pour tous les circuits intégrés. Ils commencent toujours par la broche en haut à gauche du circuit intégré vu de dessus et sont numérotés dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Je me référerai toujours à ces nombres par « broche 1 », « broche 2 », et ainsi de suite. Les nombres figurant à l'intérieur du circuit sont les valeurs que représentent les broches quand leur niveau est haut. Par exemple, si la broche 22 est haute, cela représente la valeur d'entrée 8. Quand la broche 20 est au niveau haut, cela correspond à une sortie de valeur 10.

Une fiche technique de ce composant peut identifier la fonction des broches par des appellations différentes qui ne sont, hélas, pas standardisées. Les broches d'entrée peuvent, par exemple, être marquées A0, A1, A2 et A3, ou encore être identifiées par A, B, C et D, ou par

DATA1, DATA2, DATA3 et DATA4. En raison d'un manque de standardisation, j'ai pensé qu'il serait utile de rendre les fonctions des broches plus claires en utilisant ma propre codification.

Dans les fiches techniques, les broches de sorties peuvent être identifiées par Y0 à Y15 ou S0 à S15 ou de façon similaire. J'ai pensé qu'il était plus clair de les identifier par Out 0 à Out 15. (Je me suis souvent demandé pourquoi les fabricants étaient aussi opposés à l'utilisation des trois lettres « Out », par exemple, plutôt qu'une seule.)

Pour en revenir à notre codification, il reste deux fonctions du circuit intégré que je n'ai pas encore expliquées. La broche 1 est la fonction *Latch Enable* (activation du verrouillage) qui est active pour un niveau bas. En d'autres termes, quand cette broche est au niveau bas, elle verrouille l'état des sorties et indique au circuit qu'il doit ignorer tout changement d'état des entrées jusqu'à nouvel ordre. Nous n'avons pas besoin de cette fonctionnalité dans le testeur de télépathie, c'est pourquoi le schéma indique une connexion de la broche 1 au pôle positif de l'alimentation. Dans les fiches techniques, la broche *Latch Enable* est souvent identifiée par LE, quelquefois aussi par *Strobe* (échantillonnage). Pourquoi, je ne sais pas.

La broche 23 est une broche *Enable* (activation), plus courante, elle est également active pour un niveau bas, ce qui signifie que le circuit est activé. Si elle est maintenue haute, le circuit est désactivé, et comme je ne

veux pas qu'il soit désactivé, la broche 23 est reliée à la masse sur le schéma. Dans les fiches techniques, cette broche est souvent identifiée par la lettre E mais elle est parfois appelée *Inhibit* (désactivation). Les circuits décodeurs ne sont plus utilisés aussi fréquemment de nos jours, ils sont cependant utiles pour des projets de petites tailles. En affectant des poids à un ensemble d'interrupteurs, puis en décodant la valeur d'entrée, ils permettent simplement de disposer d'un puissant outil d'évaluation de l'interaction d'un utilisateur.

Pouvez-vous imaginer une autre application ou nous pourrions faire de même ? Eh bien, et le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux ? Il y a six interrupteurs dans ce jeu, que se passerait-il si nous les connectons à un décodeur à 6 bits ? Cette idée souffre de deux faiblesses. D'une part, il n'existe pas de décodeur à 6 bits, et d'autre part, si un tel circuit existait, il aurait 64 broches de sortie. C'est beaucoup à traiter, en particulier parce que la plupart des combinaisons n'auraient aucun sens car elles signifieraient qu'un joueur tricherait en appuyant sur plus d'un interrupteur. Nous devrions relier par un circuit OR des dizaines de sorties juste pour illuminer l'indicateur « tricherie ».

Il existe en revanche des décodeurs à 3 bits. Nous pourrions peut-être utiliser l'un d'entre eux pour chaque ensemble d'interrupteurs. Cela serait-il bien utile ? Ma réponse à cette question est : « peut-être ». Je vais m'en expliquer dans la prochaine expérience.

Décoder Pierre, Feuille, Ciseaux

Expérience

20

Je vous invite à étudier la fig. 20-1. Ce circuit est le plus simple que j'ai imaginé pour créer un jeu complet de Pierre, Feuille, Ciseaux utilisant deux décodeurs pour simplifier la logique tout en conservant les interrupteurs pour piloter les LED et le buzzer. Du fait qu'il comporte à la fois des interrupteurs et des portes logiques, il peut être considéré comme un circuit hybride.

La logique

Commençons par étudier la partie logique. Pour rappel, à la fin de l'expérience 17, j'ai précisé que les portes logiques ne convenaient pas et compliquaient la détection de tricherie par l'un ou l'autre des joueurs. Cette difficulté est maintenant levée.

Dans le schéma, chacun des interrupteurs possède maintenant un poids binaire de 1, 2 ou 4, et chaque ensemble de trois interrupteurs est relié aux entrées d'un décodeur à trois bits. Toutes les combinaisons des interrupteurs peuvent donc être identifiées par les huit sorties numérotées 0 à 7. J'ai réorganisé la disposition des sorties sur le schéma, afin de minimiser les croisements et la sortie 0 n'est pas utilisée.

Observons un seul des décodeurs, leurs connexions étant identiques. La sortie 3 du décodeur A ne peut être activée que si le joueur A appuie sur les interrupteurs 1 et 2 simultanément. La sortie 5 ne peut être activée qu'en appuyant sur les interrupteurs 1 et 4 ainsi de suite. En conséquence, nous savons que si la sortie 3, OU (OR) la sortie 5 OU (OR) la sortie 6, OU (OR) la sortie 7 du décodeur A est activée, le joueur A a triché. Nous relierons simplement ces quatre sorties à une porte OR à quatre entrées dont nous relierons la sortie à l'indicateur « Joueur A triche » et le circuit antitriche est terminé.

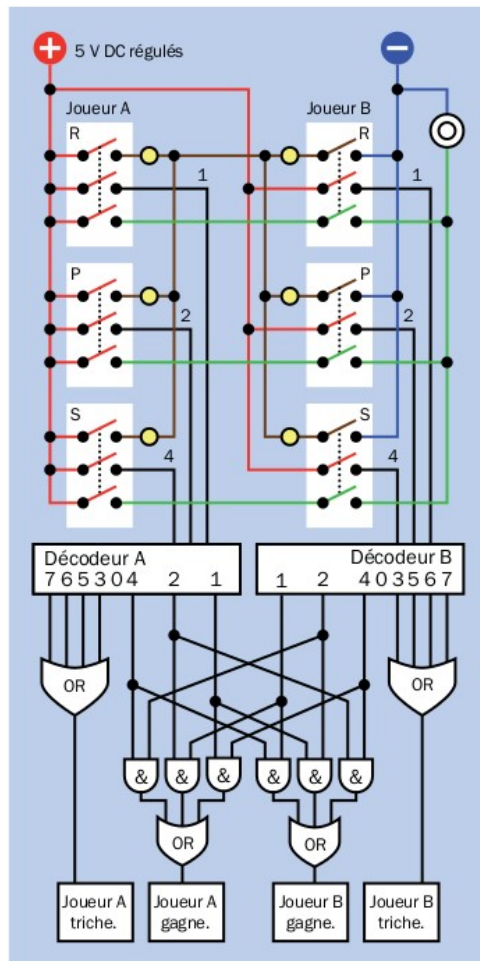


Figure 20-1. La façon la plus simple de réaliser le jeu Pierre, Feuille, Ciseaux est probablement de mixer décodeurs, portes logiques et interrupteurs multipolaires.

Le reste de la logique est identique à celle utilisée précédemment. J'ai placé plusieurs connexions entre les portes logiques en diagonale afin de rendre le circuit plus lisible. Par exemple, supposons que le joueur A appuie sur l'interrupteur 4 (Ciseaux). Si le joueur B appuie sur l'interrupteur 2 (Feuille), les ciseaux coupent le papier donc le joueur B gagne. Ceci est illustré sur la fig. 20-2 où les lignes en rouge sont activées au niveau haut.

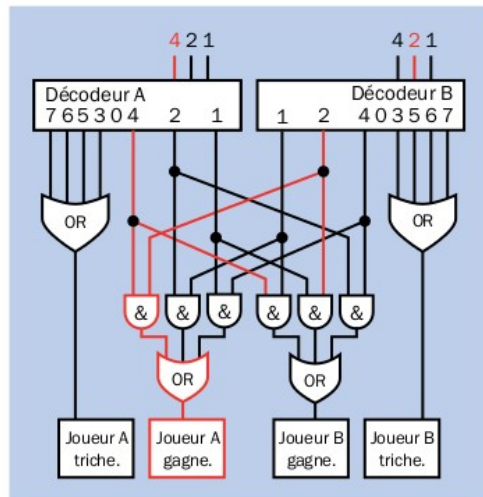


Figure 20-2. Dans cet exemple, le joueur A choisit la pierre et le joueur B les ciseaux à l'aide du groupe d'interrupteurs du schéma précédent.

Vous pouvez vérifier toutes les combinaisons possibles de cette façon.

Mais que se passe-t-il si les deux joueurs appuient sur l'interrupteur de même poids binaire, réalisant un coup nul ? La combinaison nulle n'active aucune des portes AND et les indicateurs gagnants restent inactifs. J'ai choisi d'utiliser les interrupteurs pour détecter cette situation car le câblage reste très simple. De façon arbitraire, j'ai coloré en vert les liaisons concernées sur la fig. 20-1. Vous constatez que si deux interrupteurs face à face sont appuyés, ils activent un buzzer placé en haut à droite du schéma. Maintenant que le schéma de câblage est simplifié, un seul buzzer convient. De plus, les LED indiquant quel interrupteur a été activé sont également commandées par les interrupteurs. Chaque LED est représentée par un cercle jaune pour

gagner de la place sur le schéma et elles sont reliées par des connexions marron. Les LED sont reliées en série comme précédemment, de façon à ce que les deux joueurs doivent faire leur choix avant qu'une LED ne puisse être allumée. Dans l'éventualité d'un coup nul, le buzzer retentit et les deux joueurs peuvent voir deux LED face à face illuminées.

Je pense avoir ainsi réalisé le jeu le plus simplement possible, sous forme électronique, mais je suis ouvert à toute autre idée.

Spécifications

Si vous concevez un système différent en utilisant soit des interrupteurs, soit des portes logiques, je serais heureux de le voir. Assurez-vous toutefois qu'il réponde bien aux critères suivants.

- Un voyant « triche » doit s'allumer si l'un des joueurs appuie simultanément sur plusieurs boutons-poussoir.
- Deux autres voyants indiquent le gagnant et ne doivent s'allumer que si aucun joueur ne triche. Remarquez que mon schéma répond à ce critère car les broches de sortie 1, 2 et 4 du décodeur A et du décodeur B ne sont activées que si un seul interrupteur est activé. Un appui sur plusieurs interrupteurs génère l'état haut d'une autre sortie des décodeurs.
- Un buzzer doit retentir s'il y a coup nul.
- Chaque bouton-poussoir doit allumer une LED indiquant qu'il a été appuyé mais uniquement quand les deux joueurs auront fait leur choix.

Un circuit OR indisponible

La version du jeu de la fig. 20-1 est maintenant composée de six interrupteurs ou boutons-poussoir, deux décodeurs, deux circuits intégrés comprenant quatre portes AND à deux entrées, un avec trois portes OU à trois entrées, un double portes OR à quatre entrées. Le tout forme un circuit comportant nettement moins de circuits intégrés que si j'avais essayé de le réaliser uniquement avec des portes logiques. De plus, le circuit est plus simple à construire et surtout à comprendre.

Si vous voulez réaliser ce circuit, cela devrait être assez simple.

Un instant cependant. Pourquoi j'utilise le mot « devrait » ? Bien qu'il semble aisé à réaliser, il ne l'est pas ! La raison en est la disponibilité des composants.

Un double circuit OR à quatre entrées n'existe pas dans la série HC. On ne le trouve que dans l'ancienne série CMOS 4000 qui n'est pas assez puissante pour piloter une LED.

C'est ennuyeux bien qu'il ne s'agisse pas d'une situation inhabituelle. Il peut arriver à tout concepteur de circuits de ne pas trouver le composant dont il a besoin ou que ce dernier ne soit plus fabriqué.

Qu'en est-il des autres composants utilisés dans ce circuit particulier ? Sont-ils disponibles ?

Le 74HC237 est un décodeur 3 bits de la série HC, pas de souci sur ce point.

Nous avons déjà utilisé des circuits triple OR à trois entrées et quadruple AND à deux entrées, nous savons donc qu'ils existent dans la famille HC.

Le seul posant problème est le double OR à quatre entrées.

Que faire alors ? Vous pouvez toujours réaliser une porte logique spécifique en utilisant d'autres portes, et c'est chose facile dans le cas d'une porte OR. La fig. 20-3 montre comment trois portes OR à deux entrées peuvent être combinées afin de réaliser la même fonction qu'un circuit OR à quatre entrées. Je peux ainsi remplacer chaque porte OR à quatre entrées de cette façon.

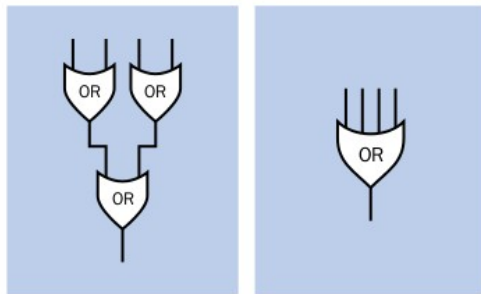


Figure 20-3. Cette configuration combinant trois portes OR à deux entrées se comporte comme une seule porte OR à quatre entrées.

C'est ennuyeux, cependant, car nous devons utiliser deux circuits quadruple porte OR à deux entrées au lieu d'un seul double porte OR à quatre entrées. Y a-t-il une autre option ?

Sauvé par un NOR

Chacune des portes OR à quatre entrées (indisponibles), disait : « Si une des sorties 3, 5, 6 ou 7 du décodeur est au niveau haut, cela signifie que deux boutons ou plus ont été appuyés ce qui équivaut à tricher. » Réfléchissons à ce que cela signifie. Si 3, OU (OR) 5, OU (OR) 6, OU (OR) 7 est haute, cela veut également dire que ni 0, NI (NOR) 1, NI (NOR) 2, NI (NOR) 4 n'est activé car ce sont les seules sorties disponibles. En d'autres termes, au lieu de chercher un niveau haut sur les sorties indiquant une tricherie, il suffit de détecter l'absence de sortie sur une des autres broches. Cela revient au même.

Une porte logique NOR à quatre entrées reliées aux broches de poids 0, 1, 2 et 4 remplit exactement la même fonction qu'une porte OR reliée aux sorties 3, 5, 6 et 7. Et devinez quoi : un circuit intégré à double porte NOR à quatre entrées est disponible dans la famille HC. Il s'agit du 74HC4002.

Pourquoi existe-t-il un circuit double porte NOR à quatre entrées et pas de double porte OR à quatre entrées ? Je n'en ai aucune idée. Et comment savoir quels types de circuits et portes sont disponibles dans chaque famille ? Wikipédia propose une liste des circuits existants. Cherchez « Liste des circuits intégrés de la série 7400. » C'est très pratique ! Après avoir vérifié que le circuit existait (en théorie), consultez le site d'un fournisseur comme <http://www.selectronic.fr> pour vous assurer qu'il est bien disponible.

Vous trouverez, sur la fig. 20-4 page suivante, le schéma de câblage modifié, en substituant les portes OR par des portes NOR. Les broches de sortie de valeur 3, 5, 6 et 7 de chaque décodeur ne sont plus reliées.

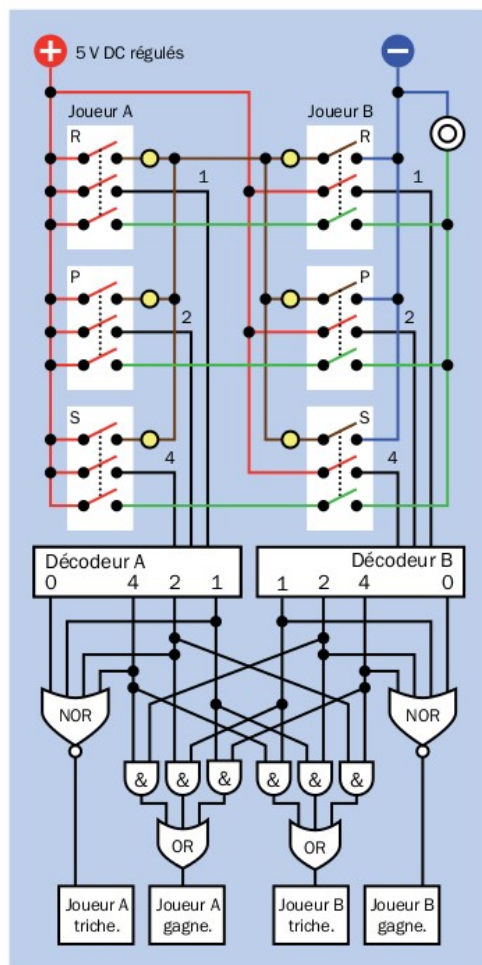


Figure 20-4. Version modifiée du schéma de câblage, utilisant deux portes NOR à quatre entrées disponibles en série HC à broches traversantes, au lieu des deux circuits OR à deux entrées.

Réalisez la version simplifiée

Maintenant que nous avons défini la logique, il est temps de mettre tout cela en place. Vous avez besoin de deux circuits quadruple AND à deux entrées 74HC08 du même type que précédemment. Leur schéma interne

est représenté sur la fig. 15-7. (Deux des portes AND de ces circuits intégrés seront inutilisées.) Il vous faut également un circuit triple OR à trois entrées 74HC4075 déjà utilisé dans l'expérience 19. Ses connexions internes sont montrées sur la fig. 19-8. (La troisième porte OR de ce circuit ne sera pas utilisée.) Enfin, le dernier circuit intégré est un double porte NOR à quatre entrées 74HC4002. Son brochage est indiqué sur la fig. 20-5.

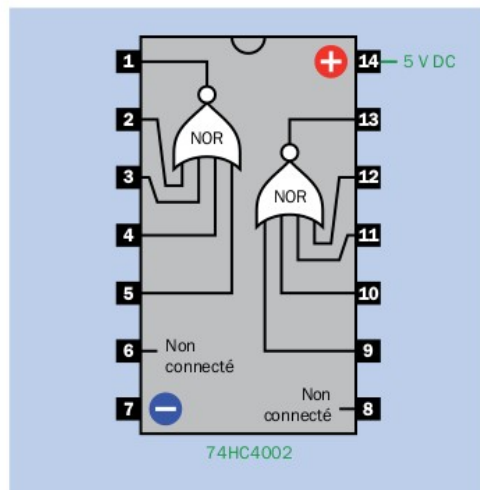


Figure 20-5. Brochage du circuit double NOR à quatre entrées 74HC4002.

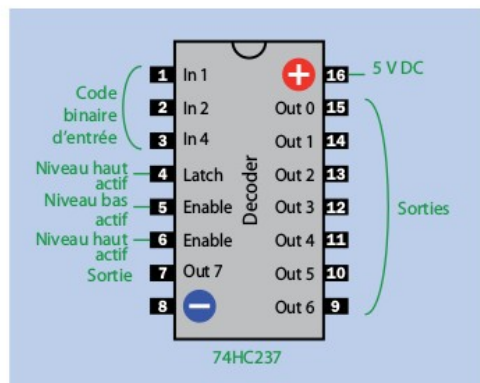


Figure 20-6. Rôle fonctionnel des broches du circuit décodeur 74HC237.

Deux décodeurs 74HC237 sont bien entendu nécessaires. La fig. 20-6 ci-contre précise le rôle de chacune des broches de ce composant. Remarquez les deux broches *Enable*, l'une permettant d'activer le circuit par un niveau haut, l'autre par un niveau bas. Les deux doivent être actives pour que le circuit délivre un signal de sortie. Ainsi, la broche 5 est reliée à la masse alors que la broche 6 est reliée au pôle positif de l'alimentation.

La broche 4 verrouille la sortie, forçant le circuit à ignorer tout changement de ses entrées. Comme la broche 4 est active pour un niveau haut, elle devra être reliée à la masse du circuit pour lui permettre de fonctionner.

J'ai utilisé le même vocabulaire que sur la fig. 19-2. Les sorties sont appelées Out 0 à Out 7. Les entrées sont identifiées par leur poids binaire, In 1, In 2 et In 4.

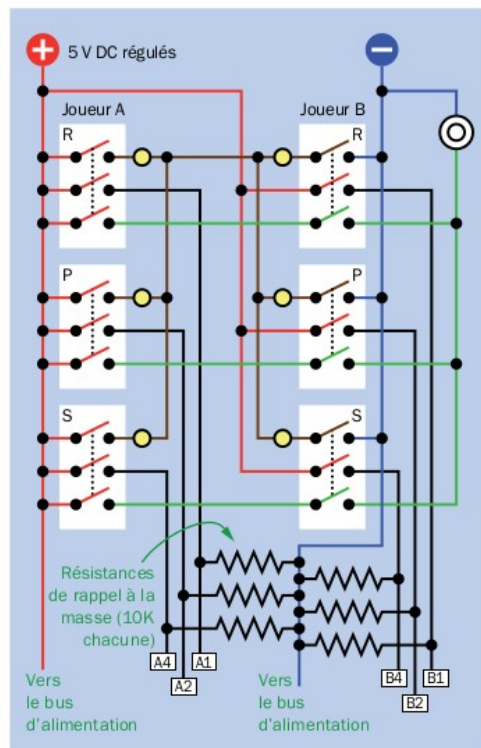


Figure 20-7. Sorties des interrupteurs devant être reliées aux liaisons de mêmes noms sur le schéma de câblage.

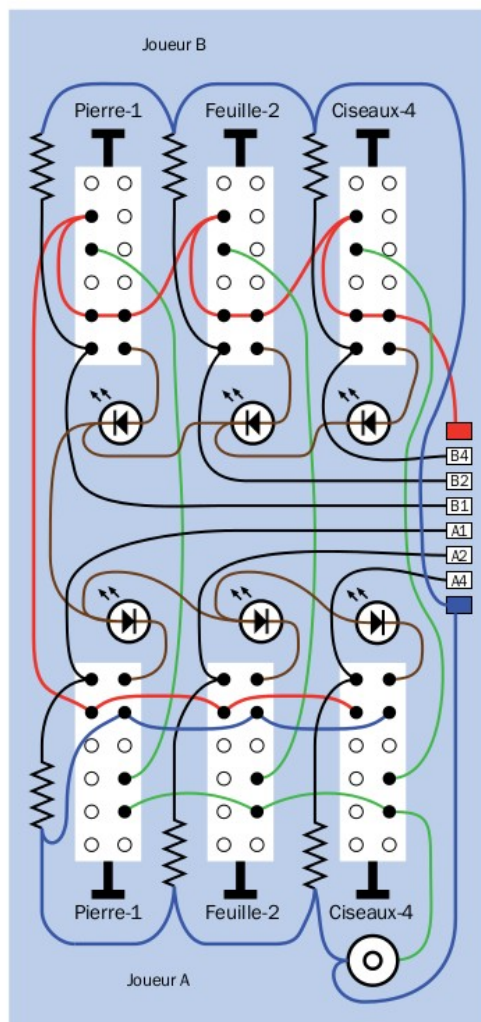


Figure 20-8. Câblage des interrupteurs à glissière figurant sur le schéma précédent. Sur le côté droit, un connecteur incluant les lignes d'alimentation positive et la masse, peut être utilisé pour relier ce circuit à la plaque de montage du circuit principal.

Avec ces informations, il est maintenant assez simple de câbler cette version hybride du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux sur une platine de montage. J'ai à nouveau représenté les interrupteurs sur un schéma séparé. Vous

le trouverez sur la fig. 20-7 page précédente. Le schéma câblage correspondant est illustré sur la fig. 20-8 page précédente.

Une vue du montage des interrupteurs sur une plaque perforée est présentée sur la fig. 20-9.

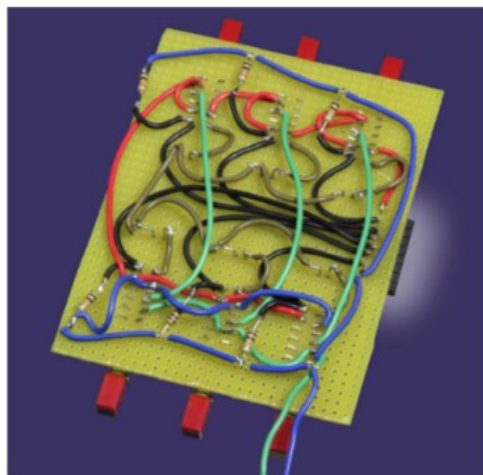


Figure 20-9. Interrupteurs à glissière devant être reliés à la version hybride du circuit du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux. Un connecteur reliant cette platine à la plaque de montage principale du jeu est visible dans la partie grisée du fond, à droite.

Chaque sortie des interrupteurs (identifiées A1, A2, etc.) se relie à l'entrée du circuit portant le même nom sur la fig. 20-10.

Comme vous le savez maintenant, je pense, je dessine les schémas en montrant les composants à l'endroit où ils seront approximativement placés sur la plaque de montage. Pour ce cas, j'ai transgressé cette règle car la place manquait sur une page imprimée pour empiler tous les circuits intégrés sur une seule colonne. Ainsi, j'ai dû tourner les décodeurs de 90°.

Le tout pourra cependant tenir sur une plaque de montage. Le circuit assemblé est montré sur la fig. 20-11. Pour tester l'ensemble, j'ai utilisé six interrupteurs tactiles miniatures, chacun tenant sur une colonne de la plaque. Vous pouvez voir leurs petits boutons jaunes et rouges en haut de la photo. Étant de type SPST, ils ne permettent pas le câblage pour la détection d'un coup nul ni d'allumer une LED. Vous aurez besoin pour cela des interrupteurs multipolaires de la fig. 20-9.

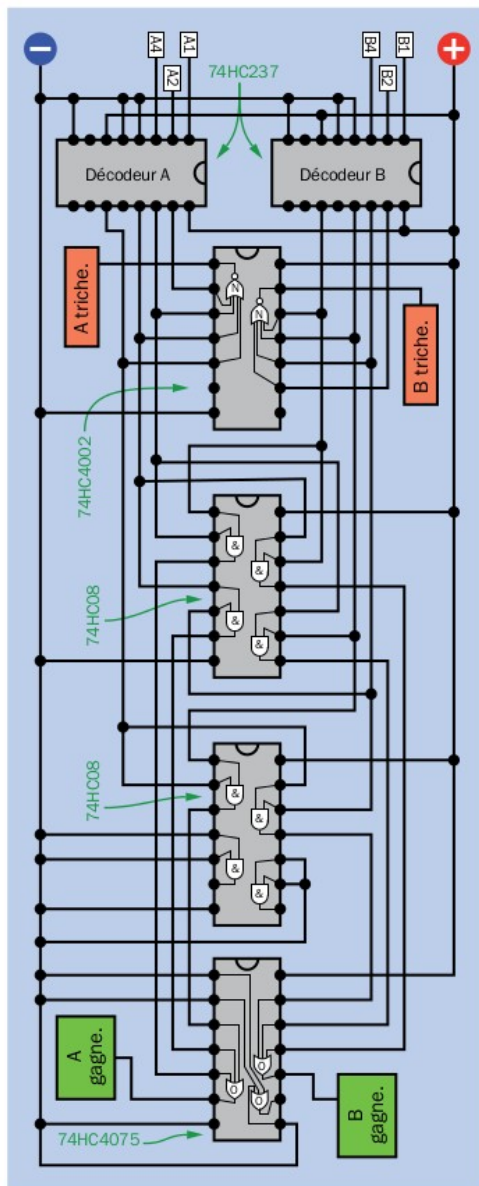


Figure 20-10. Schéma de câblage de la version hybride du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux.

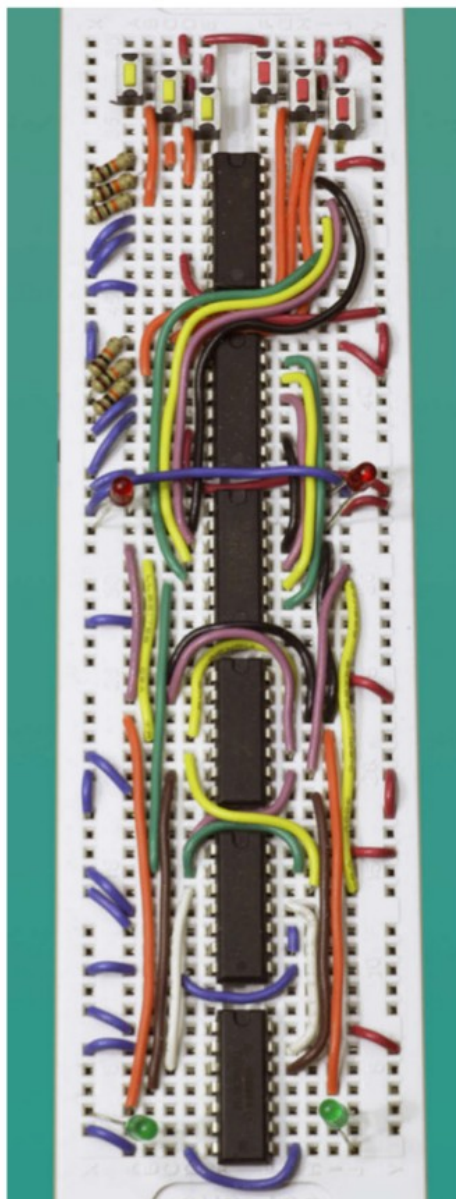


Figure 20-11. Version du schéma du jeu Pierre, Feuille, Ciseaux, réalisée sur une plaque de montage.

Pour aller plus loin

Ne résistant jamais à l'envie de réfléchir à de nouvelles fonctions pouvant être ajoutées à un projet, il m'est venu à l'idée que les interrupteurs de ce circuit pourraient jouer un rôle supplémentaire. Les interrupteurs ou boutons-poussoir tripolaires sont relativement peu courants. Vous utiliserez probablement des boutons-poussoir quadripolaires, ce qui laisse ainsi un pôle inutilisé sur chaque interrupteur. Y a-t-il un rôle intéressant à donner à ces contacts inutilisés ?

Eh bien, oui. Vous pouvez vous en servir pour connecter l'alimentation au reste du circuit. Dans la version du jeu n'utilisant que des interrupteurs, j'avais trouvé agréable de ne pas avoir besoin d'interrupteur marche-arrêt. Les interrupteurs reliaient l'alimentation en même temps qu'ils indiquaient les résultats de chaque partie. Vous pourriez reproduire cela dans la version hybride. Connectez en parallèle au pôle positif de l'alimentation tous les contacts inutilisés des interrupteurs du joueur A de telle manière que chaque bouton appuyé alimente séparément les décodeurs et les circuits logiques. Les interrupteurs du joueur B pourraient être reliés de façon identique. Aussitôt qu'un joueur appuie sur un bouton-poussoir, le circuit est alimenté, prêt à interpréter la combinaison des interrupteurs d'entrée. Sitôt que les interrupteurs sont relâchés, le circuit est automatiquement mis hors tension.

Ai-je réalisé cette version améliorée ? Non, je ne l'ai pas fait, c'est pour cela que j'ai juste évoqué un aperçu de ce que cela pourrait être, vous laissant le choix d'ajouter cette possibilité vous-même.

Décodage

Si vous recherchez des décodeurs dans le catalogue d'un fournisseur de composants, vous trouverez probablement trois autres catégories de circuits : les encodeurs, les multiplexeurs et les démultiplexeurs. Cela peut prêter à confusion car un même circuit peut être décrit comme étant un décodeur ou un multiplexeur. Qu'est-ce qu'un multiplexeur exactement ?

Ma tâche, étant, ici, d'éliminer toute confusion (ou au moins de la réduire de façon acceptable), ce sera donc le prochain sujet que je vais traiter.

La fente magique

J'ai précisé précédemment que, en raison de son absence de mémoire, une pièce de monnaie avait autant de chance de tomber côté pile que côté face à chaque lancer (voir expérience 17). Les probabilités sont toujours les mêmes. Pour la même raison, si la traditionnelle roue de la fortune est lancée de façon aléatoire à chaque fois, la probabilité de tomber sur n'importe quel nombre ne change jamais.

Tous les jeux ne se comportent pas comme ça. Si vous avez joué à la bataille navale, par exemple, vous savez que vos chances de gagner évoluent durant le jeu, particulièrement quand vous avez éliminé un grand nombre de cases vides, ne laissant guère de place aux navires de vos adversaires pour se cacher.

J'ai décidé de créer un jeu d'argent à deux joueurs avec des pièces de monnaie, dont les probabilités de victoire évoluent. Initialement, l'enjeu est faible, les chances de gagner aussi, mais au fur et à mesure que les joueurs misent des pièces, le jackpot augmente, et les probabilités de l'emporter s'améliorent. J'ai pensé que cela apporterait une tension dramatique au jeu, même si on utilise des jetons plutôt que des pièces de monnaie.

C'est ainsi qu'est né le jeu de la « fente magique ».

Si vous lisez le magazine *Make*, vous vous rappelez sans doute que l'un de mes articles traitait d'un jeu utilisant des pièces de monnaie pour compléter un circuit électrique et gagner un lot. Le jeu de la fente magique est basé sur le même principe, mais, sur bien d'autres aspects, il est très différent.

Multiplexez

Ce jeu me permet de tenir ma promesse et de vous présenter le multiplexeur. Les Anglo-Saxons utilisent souvent l'abréviation « Mux » pour ce composant.

Il existe de nombreuses variantes de ce circuit, celle que j'ai choisie pour cette expérience est le 4067B. Il s'agit d'un circuit intégré CMOS ancien, mais, à l'inverse des autres circuits CMOS, il n'est pas limité à un faible courant de sortie. On peut l'assimiler simplement à un canal par lequel le courant circule.

Insérez le 4067B dans votre plaque de montage et ajoutez quatre interrupteurs et leurs résistances de rappel comme le montre la fig. 21-1 page suivante. Le circuit s'apparente au circuit de test d'évaluation du décodeur 4514 (voir la fig. 19-4), exception faite qu'au lieu d'avoir seize broches de sortie, nous avons seize « canaux » qui peuvent servir d'entrée.

Afin de simplifier le schéma, les interrupteurs sont situés en bas de la figure car les broches auxquelles ils sont reliés le sont également.

Vous n'avez pas besoin de votre multimètre pour tester le multiplexeur car il est capable de piloter une LED. Celle-ci est reliée à la broche 1, nommée « sortie/entrée commune » pour les raisons que je vais expliquer dans un instant. Une résistance en série protège la LED contre les surintensités et un potentiomètre permet de faire varier le courant qui la traverse.

Le fil relié au potentiomètre est allongé et possède deux petits embouts comme ceux que je vous ai recommandé de ne pas utiliser. C'est un fil de liaison flexible que j'ai baptisé « liaison volante » parce qu'il vous pouvez le connecter à divers endroits du circuit. Pour l'instant, son extrémité appelée J2 est relié à la masse.

Si vous n'avez pas de fils de cette sorte, vous pouvez utiliser un morceau de fil rigide de 0,2 mm² dénudé sur quelques millimètres à chaque extrémité.

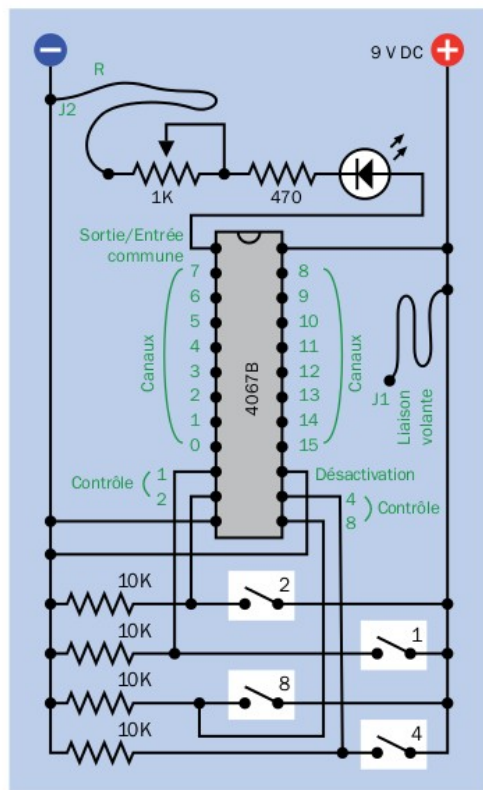


Figure 21-1. Circuit de test d'un multiplexeur analogique.

Sur la droite du schéma, il y a une autre « liaison volante », je veux pouvoir relier son extrémité J1 à chacune des broches des canaux numérotés de 0 à 15.

Vous pouvez alimenter le circuit avec une tension de 9 V DC, à partir d'une pile. La tension ne nécessite pas d'être régulée et vous n'avez pas besoin de condensateur de filtrage. Attention, cependant, les circuits CMOS sont sensibles à l'électricité statique, prenez donc les précautions habituelles en vous reliant vous-même à la terre avant de les manipuler.

Déplacez vos liaisons

Observez ce qui se passe si l'on ferme les interrupteurs 2 et 4. S'ils fonctionnent comme les interrupteurs utilisés avec l'encodeur, ils devraient activer le canal 6 car le numéro de canal est déterminé en additionnant les poids des interrupteurs fermés.

Je suis sûr que si vous reliez le fil J1 à la broche du canal 6, votre LED s'illuminera. Un courant positif issu du pôle positif de l'alimentation transite par le fil J1 jusqu'au canal numéro 6. Une liaison interne au circuit intégré envoie ce courant jusqu'à la sortie/entrée commune, broche 1. De là, il traverse la LED et les résistances en série pour retourner à la masse via la liaison J2.

Ajustez le potentiomètre de 1K et vous constaterez que la luminosité de la LED varie. Notez qu'ainsi, vous ne modifiez pas uniquement l'intensité de sortie, mais aussi l'intensité qui traverse le circuit intégré. Vous pouvez utiliser un multimètre réglé pour la mesure des intensités en mA, placé en série avec le fil J1, vous remarquerez alors que le courant varie aussi bien côté entrée que côté sortie du circuit intégré.

En contrepartie de ce petit service, le circuit intégré prélèvera une fraction de la tension pour son propre usage. Vous pourrez le démontrer en réglant votre multimètre pour la mesure des tensions en volts entre la broche 6 et la sortie/entrée commune.

Passons maintenant à la partie intéressante du test.

- Reliez J1 à chacune des autres broches des canaux, la diode LED devrait rester éteinte.
- Si vous modifiez la combinaison des interrupteurs, un canal différent devrait être activé.

Fermez tous les interrupteurs, la somme de leurs valeurs (8 + 4 + 2 + 1) doit alors activer la broche du canal 15.

Qu'avez-vous appris jusqu'ici ? Et que vous reste-t-il à connaître ?

En bref : les multiplexeurs

- Comme un décodeur, ce multiplexeur possède quatre broches de contrôle binaires.
- Il semble fonctionner à l'inverse d'un décodeur. Au lieu de délivrer un signal de sortie à une broche numérotée de 0 à 15, il reçoit un courant par une broche de valeur 0 à 15. Ces broches sont reliées

à l'intérieur du circuit intégré, avec la sortie/entrée commune au travers de « canaux. »

- La combinaison de signaux aux broches de contrôle détermine le canal sélectionné.
- Le canal sélectionné transmet le courant d'une des entrées vers la broche de sortie/entrée commune.
- Les canaux non sélectionnés ne transmettent aucune intensité. (En réalité, il existe un léger courant de fuite négligeable.)
- L'intensité d'entrée maximale est de 25 mA mais elle diminue lorsque la tension augmente. Chaque transistor transmettant le courant à une puissance dissipée maximale de 100 mW.
- La tension d'alimentation peut varier de 3 V DC à 20 V DC.
- La tension appliquée à un canal ne peut excéder la tension d'alimentation et ne doit pas être inférieure à la tension du pôle négatif de l'alimentation (masse).
- Il est facile d'assimiler un multiplexeur à un contacteur rotatif comme illustré sur la fig. 21-2. Sur cette figure, les broches de contrôle 2 et 8 ont été sélectionnées arbitrairement de façon à réaliser une liaison interne entre le canal 10 et la sortie/entrée commune.

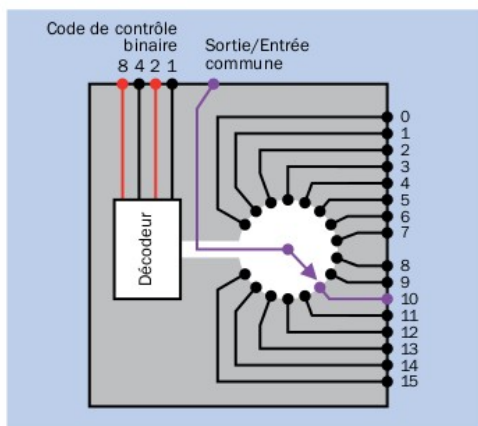


Figure 21-2. Un multiplexeur fonctionne comme un sélecteur rotatif. La liaison violette est établie par le code binaire appliqué aux broches de contrôle.

Brochage du multiplexeur

Le brochage du circuit intégré 4067B est représenté sur la fig. 20-3. Les entrées de contrôle sont marquées 1, 2, 4 et 8 selon leur poids binaire (dans une fiche technique, ces broches pourraient être marquées A, B, C et D). Les canaux sont libellés Chan 0 à Chan 15 (dans une fiche technique, ces canaux pourraient être marqués Y0 à Y15, ou de façon similaire).

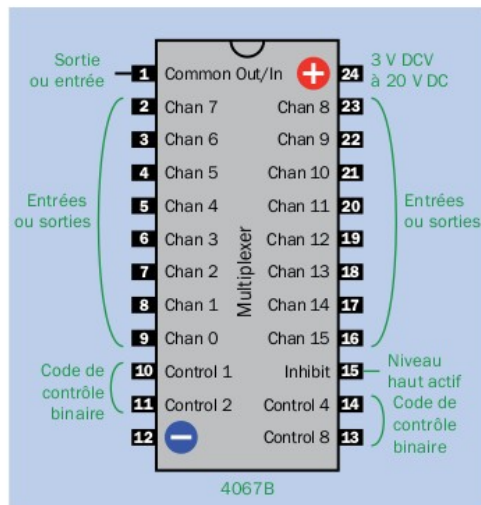


Figure 21-3. Brochage du multiplexeur 4067B.

En plus des broches déjà décrites, il y a une entrée de désactivation (*Inhibit*) à la broche 15. Cette entrée est active au niveau haut ce qui signifie que le circuit sera désactivé et ne réagira pas aux signaux de contrôle, si cette broche est reliée au pôle positif de l'alimentation. Comme je ne le souhaite pas, cette broche est reliée à la masse dans le circuit de test. Vous pouvez essayer de la relier au pôle positif de l'alimentation, vous constaterez alors que tous les transistors du circuit intégré sont bloqués.

Applications des multiplexeurs

J'ai recours à ce multiplexeur dans le jeu des pièces de monnaie auquel je pense. Mais dans quel but est-il normalement utilisé ?

Considérons ses possibilités. En fonction de ses entrées de contrôle, il peut sélectionner un canal d'entrée parmi 16 et envoyer le signal à la broche commune très rapidement. En fait, il est tellement rapide qu'il est capable de traiter deux signaux de télécommunication ou plus sur ses canaux d'entrée et les échantillonner l'un après l'autre en séquence, puis de les mélanger en un seul signal. Ainsi, un seul fil peut véhiculer deux, quatre, voire davantage de signaux. À l'autre extrémité, il faudra bien entendu répartir le signal transmis selon les différents canaux d'origine. Pour cela, vous aurez besoin d'un... démultiplexeur !

Le multiplexeur dont nous parlons, le 4067B, peut également être utilisé comme démultiplexeur, en effet, ses canaux, sur son brochage sont marquées « Entrées ou sorties », c'est aussi pour cela que la broche commune est appelée « Sortie/Entrée commune ». En fait, le multiplexeur ne se soucie pas du sens dans lequel le courant le traverse.

Vous pouvez le constater vous-même en modifiant votre circuit de test comme sur la fig. 21-4. Le fil volant J1 est maintenant relié à la masse alors que le fil J2 est relié au pôle positif de l'alimentation et la LED est inversée puisque le courant doit circuler en sens inverse.

Vous vous demandez peut-être pourquoi un multiplexeur n'est pas appelé multiplexeur/démultiplexeur, puisque c'est ce qu'il fait. En vérité, si vous consultez les fiches techniques, il est habituellement désigné comme multiplexeur/démultiplexeur mais c'est trop long à prononcer, si bien que par habitude il est appelé « mux » outre-Atlantique. Un multiplexeur est également utilisé pour commuter plus lentement de multiples entrées. Dans un ordinateur, par exemple, il peut sélectionner plusieurs sorties vidéo.

Dans un système stéréophonique, il permet de choisir parmi plusieurs sources, un lecteur de CD, de DVD, un lecteur MP3 ou une autre source audiophonique. Selon la combinaison appliquée aux entrées de contrôle, le multiplexeur choisira une entrée et la reliera à la broche commune de sortie. Auparavant, des contacteurs rotatifs ou un clavier s'en chargeaient, mais un circuit intégré commutateur est beaucoup plus fiable et ne génère pas les bruits parasites caractéristiques des contacts mécaniques.

Un appareil stéréophonique possède deux canaux audiophoniques (plus si vous avez un système Home Cinéma 5.1). Pour répondre à ce besoin, procurez-vous

des multiplexeurs ayant deux ou davantage de commutateurs utilisant les mêmes entrées de contrôle. Ces multiplexeurs peuvent se comparer à des sélecteurs rotatifs à plusieurs galettes de contact ayant un seul axe commandé par un bouton.

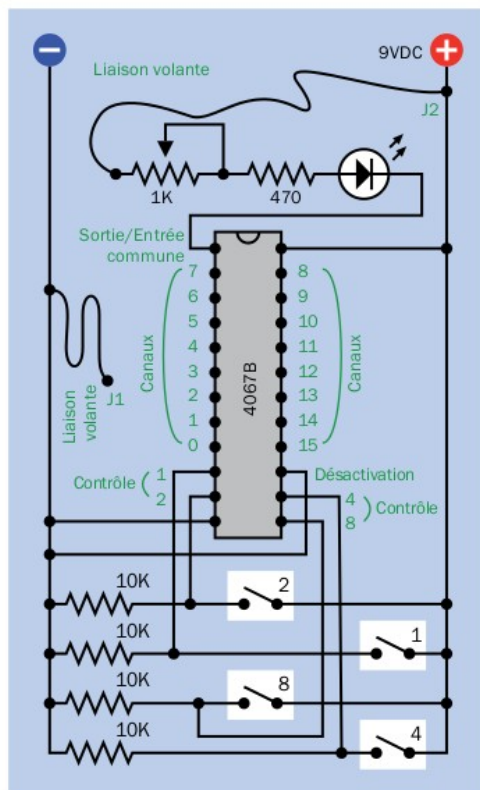


Figure 21-4. Le fil J2 étant connecté au pôle positif de l'alimentation, vous pouvez mettre en évidence les possibilités bidirectionnelles du multiplexeur en utilisant J1 pour écouler le courant vers la masse. N'oubliez pas d'inverser la polarité de la diode LED afin qu'elle corresponde au sens du courant.

Comparaison entre multiplexeur analogique et digital

Le 4067B est un multiplexeur analogique. Cela signifie qu'il peut transmettre, en les préservant, des signaux analogiques variant entre la masse et le positif de l'alimentation.

mentation. Vous pourriez par exemple connecter un multiplexeur à un interphone audio pour distribuer sa sortie vers différentes pièces de votre logement.

Des multiplexeurs digitaux sont également disponibles. Leurs entrées doivent être à un niveau haut ou bas habituel pour un circuit logique. Le multiplexeur digital utilise un code binaire à ses entrées de contrôle pour sélectionner un canal (exactement comme un multiplexeur analogique), et il évalue le niveau appliqué à l'entrée. En revanche, le circuit génère son propre signal de sortie afin de garantir sa conformité avec les normes des signaux digitaux.

Un multiplexeur digital n'est pas réversible. Les canaux sont des entrées, la broche commune est une sortie et c'est tout. Les signaux analogiques ne peuvent pas être utilisés avec ces multiplexeurs.

Puisqu'un multiplexeur digital n'est pas réversible, comment décoder son signal de sortie à l'autre extrémité de la liaison ? Eh bien on utilise un décodeur ! Les entrées de contrôle d'un décodeur peuvent être synchronisées selon la rapidité avec laquelle les paquets de données transitent afin de découper le flot de données en segments de taille correcte.

Un décodeur est absolument identique à un démultiplexeur digital, c'est pourquoi cette terminologie est rarement utilisée. Un démultiplexeur est donc similaire à un décodeur. Ceci explique pourquoi les fournisseurs de composants classent souvent les encodeurs, les décodeurs, les multiplexeurs et les démultiplexeurs dans la même catégorie. Le fournisseur n'essaie pas de séparer les différentes variétés. Il indique uniquement les différentes options et vous laisse choisir.

Afin de vous aider dans ce choix, voici un résumé.

En bref: les différentes sortes de multiplexeurs-démultiplexeurs

- Un *décodeur* peut avoir deux, trois ou quatre broches de contrôle. Un code binaire est appliqué à ces entrées pour sélectionner une broche de sortie parmi une série de valeurs croissantes débutant à 0. La broche sélectionnée a un niveau de sortie haut. Les autres sorties sont au niveau bas. Le décodeur est un circuit digital utilisant les niveaux logiques haut et bas. Il n'est pas bidirectionnel.
- Un *encodeur* est l'inverse d'un décodeur. Il a de multiples entrées, chacune portant un numéro

décimal positif partant de 0. Une seule entrée doit avoir un niveau haut à un instant donné. L'encodeur convertit cette entrée en une valeur binaire de deux, trois ou quatre bits qui est appliquée à deux, trois ou quatre broches de sortie. C'est un circuit digital utilisant les niveaux logiques haut et bas. Il n'est pas bidirectionnel. (Nous n'avons pas encore rencontré d'encodeurs dans ce livre, mais cela viendra.)

- Un *multiplexeur digital* ressemble à un encodeur en cela qu'il reçoit une entrée parmi plusieurs ayant chacune une valeur décimale positive commençant à 0. En revanche, il n'a qu'une seule broche de sortie commune. La combinaison présente aux deux, trois ou quatre broches de contrôle détermine quelle broche d'entrée est en relation avec la sortie commune. C'est un circuit numérique traitant les signaux logiques haut et bas. Il n'est pas bidirectionnel.
- Un *multiplexeur analogique* est semblable à un multiplexeur digital mais il ne crée pas son propre signal de sortie. C'est le composant que vous avez testé dans cette expérience. Il transmet fidèlement le signal d'entrée de l'un de ses canaux à la broche commune par l'intermédiaire d'une liaison interne. Ainsi, il se comporte comme un sélecteur rotatif électronique qui serait commandé numériquement. Il fonctionne aussi bien avec ses signaux alternatifs que des signaux continus dans une large gamme de tension, de plus il est réversible.
- Un *démultiplexeur analogique* n'est qu'un multiplexeur analogique utilisé en mode inversé, la broche commune étant utilisée en entrée et la broche du canal sélectionné est la sortie.
- Un *démultiplexeur digital* est en fait identique à un décodeur.

Conception du jeu

J'ai dû commencer par de nombreuses explications avant de pouvoir revenir à la réalisation du jeu de la fente magique. Quoi qu'il en soit, voici comment je conçois ce jeu. Je dispose d'un boîtier comportant seize fentes pouvant recevoir chacune une pièce de monnaie. Lorsqu'une pièce est insérée dans une fente, elle crée une liaison électrique entre deux contacts internes. Les contacts de l'une des fentes, choisie au hasard, seront actifs. Il s'agira de la fente magique. Elle est activée

par un multiplexeur avant le début de la partie mais aucun des joueurs ne peut savoir de laquelle il s'agit. À son tour, un joueur place une pièce dans une des fentes libres. S'il ne s'agit pas de la fente magique, rien ne se passe, le joueur suivant insère alors une pièce. Les joueurs jouent jusqu'à ce que l'un d'entre eux choisisse la fente magique, un buzzer se faisant alors entendre. Le gagnant remporte alors toutes les pièces mises en jeu dans les emplacements. Un des joueurs doit ensuite réinitialiser le jeu pour une autre partie en appuyant sur un bouton-poussoir. Le multiplexeur désigne à nouveau une fente magique et le jeu recommence.

Le diagramme logique de la fig. 21-5 explique comment réaliser ce jeu.

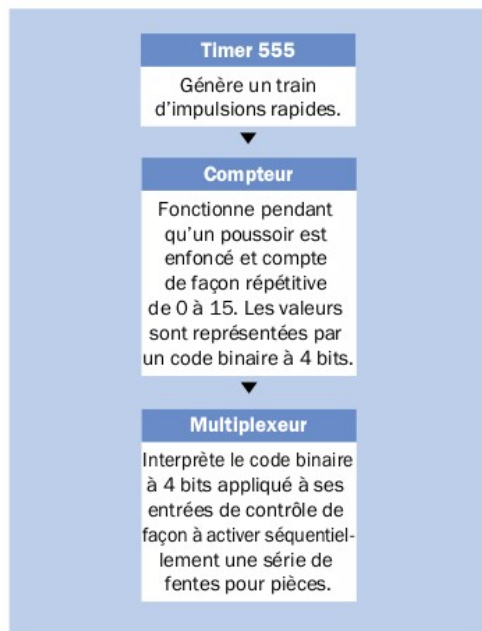


Figure 21-5. Le système choisit un nombre au hasard qui sera interprété par le multiplexeur pour sélectionner une fente parmi seize.

Un simple temporisateur 555, fonctionnant en mode asynchrone, générera environ 50 000 impulsions par seconde, c'est-à-dire 50 kHz. Le timer pilotera un circuit intégré compteur qui comptera sans cesse de 0 à 15, délivrant ainsi à ses sorties une série de codes binaires à 4 bits. Ces valeurs binaires de 4 bits seront appliquées

aux entrées de contrôle du multiplexeur. Un joueur activera le compteur en enfonçant un poussoir et stoppera le compteur de façon totalement aléatoire en le relâchant. Une fente sera ainsi sélectionnée aléatoirement. J'ai utilisé un principe similaire dans *L'Électronique en pratique*, si vous l'avez lu, cette approche vous paraîtra familière.

Comptage des fentes

Je souhaite utiliser une alimentation de 9 V DC pour le multiplexeur de façon à minimiser les effets dus à sa résistance interne. Existe-t-il un compteur fonctionnant sous 9 V ? Oui, le compteur 4520B, qui est également un ancien circuit CMOS, est toujours fabriqué en grande quantité. Son brochage est indiqué sur la fig. 21-6.

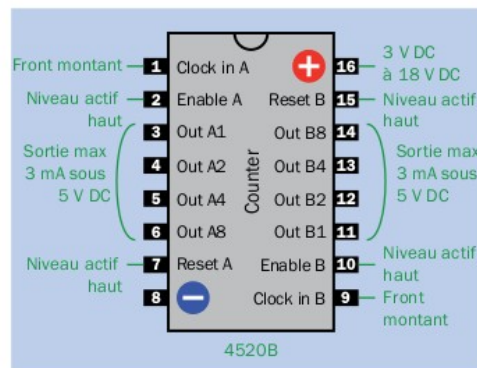


Figure 21-6. Brochage du circuit intégré CMOS 4520B, qui compte sans cesse de 0 à 15 et fournit la valeur sous forme d'un code à 4 bits, sur ses sorties.

En réalité, le 4520B comprend deux compteurs à 4 bits pouvant être interconnectés de façon à créer un compteur à 8 bits capable de compter de 0 à 255. Nous n'avons besoin que de 4 bits, je n'utiliserai donc pas la seconde moitié du circuit.

Sur la fig. 21-6, j'ai nommé arbitrairement un des compteurs A et l'autre B. Les fiches techniques des fabricants les identifient peut-être de cette façon ou d'une manière différente. J'ai également identifié ses sorties en fonction de leur poids binaire (1, 2, 4 ou 8). Les fiches techniques les appellent habituellement Q1, Q2, Q3 et Q4 ou de façon similaire. Il n'existe pas de règle.

La broche de réinitialisation (*Reset*, active au niveau haut) force toutes les sorties à 0, ce qui ne présente

aucun intérêt pour nous, car nous voulons une valeur de sortie arbitraire et aléatoire. Nous laisserons donc cette broche reliée en permanence à la masse de façon à la désactiver.

La broche d'activation (*Enable*, également activée par un niveau haut) signifie que le compteur s'incrémente quand son niveau est haut et stoppe, en maintenant sa valeur, lorsque cette broche est maintenue au niveau de la masse. Cette fonction sera utilisée dans le jeu de la fente magique pour arrêter le compteur et ainsi, choisir aléatoirement un emplacement.

L'entrée de l'horloge (*Clock*) incrémente le compteur quand le signal qui lui est appliqué passe de l'état bas à l'état haut. (Si une transition du haut vers le bas est souhaitée, on peut appliquer le signal d'horloge à la broche d'activation (*Enable*) et maintenir l'entrée de l'horloge (*Clock*) à la masse. Cette possibilité ne présente aucun intérêt pour notre jeu.)

Conception du circuit

Vous pouvez maintenant réaliser le circuit permettant de générer un nombre au hasard entre 0 et 15. Un schéma de câblage est illustré sur la fig. 21-7.

Le compteur et le multiplexeur sont tous deux des circuits CMOS ou similaires, ils peuvent donc être reliés ensemble sans problème. Ils devraient également être compatibles avec la sortie du temporisateur 555. Le seul problème potentiel vient du fait de la tendance d'un timer 555 de type bipolaire à générer des pics de tension qui pourraient être pris en compte par le compteur et interprétés par erreur comme des cycles d'horloge. On s'affranchira de ce problème en connectant un condensateur de 100 μF entre la broche d'alimentation et la broche de masse du timer. Faites en sorte que le condensateur soit placé au plus près des broches d'alimentation et masse du timer et minimisez la longueur de ses fils de connexions.

Quand l'interrupteur marche-arrêt, en haut et à gauche du schéma est fermé, la diode LED s'allume, le temporisateur 555 démarre immédiatement et envoie des impulsions d'horloge au compteur 4520B à travers le condensateur de liaison. Une résistance de rappel vers la masse de 10 K, reliée à la broche 2 (l'entrée d'activation), empêche le compteur de s'incrémenter.

Pour générer un nombre aléatoire, le bouton-poussoir doit être appuyé.

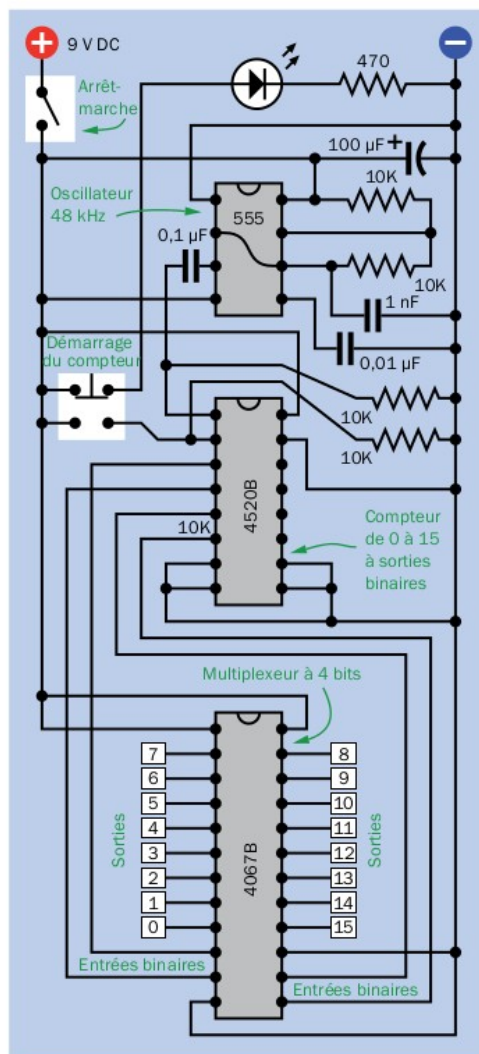


Figure 21-7. Plan de câblage du circuit du jeu de la fente magique.

La broche 2 est alors reliée au pôle positif de l'alimentation, contrariant l'action de la résistance de rappel et activant le compteur qui réagit aux impulsions transmises par le timer. Quand le poussoir est relâché, le

compteur s'arrête à nouveau sur une valeur aléatoire. La LED s'allume pour indiquer que le jeu est prêt.

La valeur sur laquelle s'est arrêté le compteur est appliquée au multiplexeur 4067B qui met alors en relation le canal sélectionné et la sortie/entrée commune qui reçoit la tension positive d'alimentation. Cette tension traverse le circuit intégré et se retrouve sur la broche du canal choisi (pour être précis, le multiplexeur se comporte donc comme un démultiplexeur).

Les seize sorties des canaux sont reliées aux seize fentes du jeu qui sont représentées sur la fig. 21-8. Les nombres écrits sur le bord gauche de cette figure indiquent les connexions à réaliser avec les sorties correspondantes du multiplexeur portant la même numérotation.

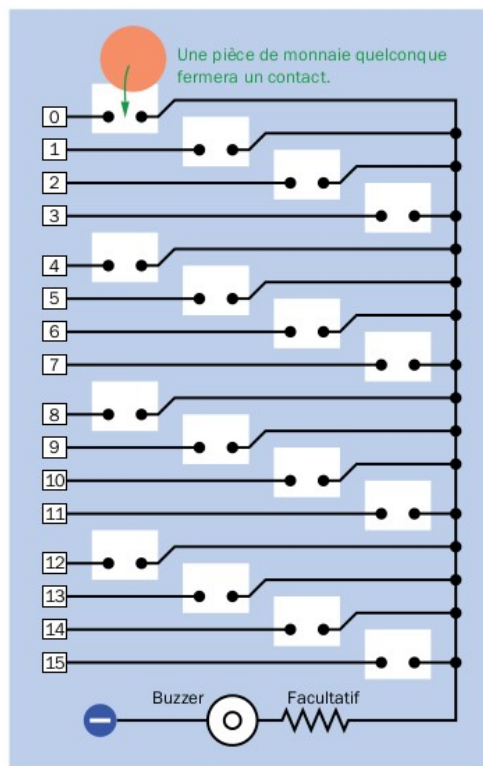


Figure 21-8. Dans ce schéma, chaque paire de contacts représente une fente du jeu de la fente magique. Une pièce de monnaie insérée dans une fente ferme le contact correspondant.

Un seul canal recevant le signal haut du multiplexeur, une seule fente est active à la fois. Quand une pièce est insérée dans cette fente, la tension parvient au buzzer qui est, par ailleurs, relié à la masse. Pour terminer le circuit, ce point de masse doit être relié à la masse de la plaque de montage. Une résistance peut être connectée en série avec le buzzer pour limiter le courant qui le traverse à environ 15 mA, évitant une surcharge du multiplexeur.

Quand les pièces sont retirées, le buzzer cesse de retentir. Le bouton-poussoir situé sur la platine de montage doit alors être enfoncé à nouveau pour générer un nouveau nombre au hasard ; dans le cas contraire, la fente active serait la même que celle de la partie précédente.

La réalisation du circuit du jeu de la fente magique ne comportant que trois circuits intégrés est assez simple. La fabrication de la platine de jeu comportant les seize fentes est plus délicate. Si vous souhaitez simplement tester le circuit sans affronter cette difficulté, vous pouvez utiliser deux composants *dipswitches* à 16 broches, de format identique à un circuit intégré comportant chacun 8 interrupteurs miniatures en lieu et place des contacts des fentes du jeu. Vous les activez au fur et à mesure pour simuler l'insertion de pièces de monnaie. Cette solution est illustrée dans la version câblée de ce jeu sur la fig. 21-9. J'ai utilisé des fils de connexions souples pour relier les interrupteurs au multiplexeur car je les utilise temporairement. Idéalement, un câble ruban plat de 17 conducteurs pourrait être utilisé (le 17^e conducteur relierait la masse de la platine de montage et la masse des interrupteurs).

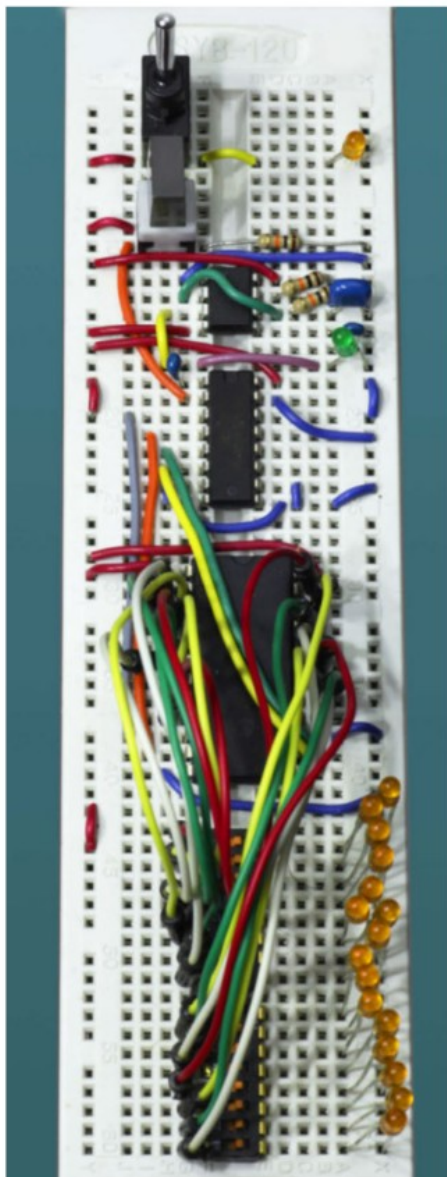


Figure 21-9. Version câblée du jeu de la fente magique utilisant des interrupteurs dipswitchs en remplacement des fentes pour les pièces de monnaie.

Réalisez la platine de jeu

Dans un article paru dans le magazine *Make*, j'ai suggéré la platine de jeu de la fig. 21-10 utilisant des petites découpes de cornière d'aluminium achetée dans une grande surface de bricolage. Pour seize emplacements vous devrez, bien entendu, réaliser quatre exemplaires de cet assemblage.

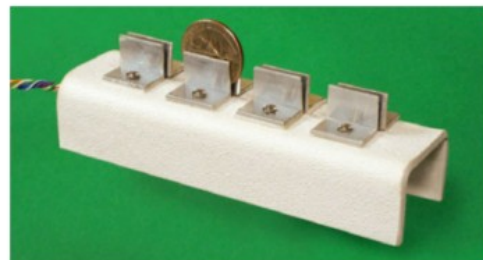


Figure 21-10. Réalisation d'une platine simple assurant un bon contact électrique pour le jeu de la fente magique.

Vous pouvez remplacer le support en plastique ABS par un morceau de bois et les contacts peuvent être installés dans une boîte munie des ouvertures nécessaires sur sa face supérieure. Je vous encourage à réaliser un jeu plus esthétique et qui évite le mélange des pièces. Je modifierai éventuellement ce projet en utilisant des capteurs infrarouges pour déceler la présence d'un jeton, mais ce ne sera pas avant l'expérience 31.

Test de la fente magique

Quand vous testerez le circuit, je vous suggère de commencer en utilisant une valeur de 47 μF pour le condensateur de temporisation du 555 afin d'obtenir une fréquence d'oscillation plus faible. Ajoutez des LED (se partageant une résistance série de 1K afin de ne pas perturber les tensions du circuit) à la sortie du timer et aux quatre sorties du compteur.

Quand le poussoir DPST n'est pas actionné, utilisez votre multimètre pour déterminer quel canal du multiplexeur est activé et assurez-vous qu'il correspond bien au code présent à ses entrées.

Quand vous serez sûr que le jeu fonctionne correctement, remplacez le condensateur par celui d'origine pour accélérer la vitesse du timer et retirez les LED, vous serez alors prêt à jouer.

Qui gagne?

En supposant que le circuit se comporte comme prévu, une question importante n'a pas encore été résolue : quand deux joueurs jouent au jeu de la fente magique, chacun d'eux a-t-il une chance égale de gagner ? La personne qui joue en premier (ou en second) a-t-elle un avantage ?

Pour s'en faire une idée, il faut procéder comme pour la création d'un circuit logique. La première étape consiste à décrire très clairement le jeu.

- Le joueur qui place la première pièce doit choisir parmi seize possibilités et une seule sera gagnante.
- Il a donc 1 chance sur 16 de gagner la partie au premier coup.

Exprimé différemment, il y a 15 chances sur 16 que le premier joueur *ne gagne pas*, le tour revient alors au second joueur. Quinze emplacements sont disponibles, le second joueur a donc 1 chance sur 15 de gagner.

Comment le jeu peut-il se terminer au second tour ? Deux choses doivent se produire pour cela.

- Le premier joueur ne doit pas avoir choisi la fente magique. Il y a 15 chances sur 16 que cela arrive.
- Le second joueur doit choisir la fente magique, il a 1 chance sur 15 d'y parvenir.

Pour calculer la probabilité que ces deux événements se produisent, il faut multiplier les chances entre elles. Si C exprime la chance que le jeu se termine au second tour :

$$C = 15/16 * 1/15$$

Si vous vous rappelez vos cours de mathématiques, les « 15 » s'annulent, donc :

$$C = 1/16$$

En d'autres termes, il existe une chance sur 16 que le jeu se termine au second tour.

Continuons encore. La chance pour que le second joueur gagne le jeu au second tour est de 1/15, la probabilité qu'il perde est donc de 14/15. S'il en est ainsi, le premier joueur essaie à nouveau et comme quatorze fentes sont disponibles, il a 1 chance sur 14 de terminer la partie au troisième coup. Si C exprime la chance que cela se produise :

$$C = 15/16 * 14/15 * 1/14$$

Les nombres 15 et 14 s'annulent, on obtient donc :

$$C = 1/16$$

En fait, la chance que le jeu se termine au premier coup, au second coup ou à n'importe quel coup, jusqu'au seizième, est toujours de 1/16.

Je ne dis pas que les probabilités de choisir la fente magique restent identiques au moment où l'on place une pièce. Au contraire, elles deviennent de plus en plus favorables au fur et à mesure que le jeu évolue puisqu'il y a de moins en moins d'emplacements disponibles. Ce que je dis est que si vous jouez des dizaines ou des centaines de fois à ce jeu, vous aurez toujours une chance sur seize que le jeu se termine au premier tour, une chance sur seize qu'il se termine au second tour et ainsi de suite.

De façon intuitive, cela me paraît étrange alors j'ai écrit un programme en langage Basic pour simuler 1 000 parties. La fonction générant des nombres aléatoires sur un ordinateur produisant assez souvent des résultats inégalement répartis, j'ai exécuté le programme plusieurs fois. Cela a confirmé l'exactitude de mes calculs.

Acceptons cette situation peu intuitive et considérons combien de pièces chaque joueur peut gagner.

Les gains

Le premier joueur insère la première pièce. Supposons qu'il soit chanceux et choisisse la fente magique dès le premier tour. La seule pièce qu'il peut gagner est celle qu'il vient de jouer. Il récupère sa pièce. Il ne fait donc aucun profit !

Si le premier joueur ne gagne pas, le second joueur insère une pièce. S'il gagne, il remporte sa pièce et celle de son adversaire, il double donc son gain. Il est évidemment beaucoup plus intéressant de remporter la partie au second tour qu'au premier.

Supposons que les deux premiers tours soient perdants. C'est maintenant au premier joueur de jouer. Si cette fois, il choisit la fente magique, il remporte la pièce qu'il vient de placer, la pièce qu'il avait insérée au premier tour et celle de son adversaire. Il récupère donc deux de ses propres pièces et l'une des pièces de son adversaire. Il réalise 50 % de bénéfice sur sa mise.

Par ailleurs, si aucun joueur ne gagne durant les trois premiers tours mais que le deuxième joueur gagne au quatrième tour, il gagne deux de ses propres pièces et

deux pièces du premier joueur. Une fois de plus, il double sa cagnotte. Autrement dit, il fait un gain de 100 %.

Jouer en second présente donc définitivement un avantage ! Mais, si nous calculons la moyenne sur un grand nombre de parties, qu'advient-il de cet avantage ?

La fig. 21-11 reprend tous les résultats possibles d'une partie. Si par exemple un jeu prend fin au premier tour, le premier joueur a inséré une pièce dans la fente magique et il récupère sa mise. Son gain net est nul. Le joueur 2 n'a, lui, inséré aucune pièce, sa mise est nulle et son gain est également nul.

Nombre de tours pour atteindre la fin du jeu	Joueur 1		Joueur 2	
	Total des pièces mises	Gain ou perte	Total des pièces mises	Gain ou perte
1	1	0	0	0
2	1	-1	1	+1
3	2	+1	1	-1
4	2	-2	2	+2
5	3	+2	2	-2
6	3	-3	3	+3
7	4	+3	3	-3
8	4	-4	4	+4
9	5	+4	4	-4
10	5	-5	5	+5
11	6	+5	5	-5
12	6	-6	6	+6
13	7	+6	6	-6
14	7	-7	7	+7
15	8	+7	7	-7
16	8	-8	8	+8
Total	72	-8	64	+8
Moyenne	4,5	-0,5	4	+0,5

Figure 21-11. Ce tableau montre les gains et les pertes de chaque joueur pour les parties se terminant du premier au seizième tour ainsi que la moyenne. En moyenne, le second joueur gagnera la moitié d'une pièce.

Les deux lignes additionnelles en bas du tableau représentent la somme de chaque colonne ensuite divisée

par 16 pour obtenir la moyenne des seize parties. Rappelez-vous qu'il y a autant de chances qu'une partie se termine au premier, au seizième ou à n'importe quel tour. Toutefois, la moyenne nous indique avec précision combien chaque joueur peut espérer gagner ou perdre lors d'une partie moyenne.

L'essentiel est qu'en moyenne, le premier joueur perd une demi-pièce par jeu tandis que le second gagne une demi-pièce par jeu.

Expliquer les probabilités

La raison qui explique cette étrange conclusion tient au fait que le premier joueur est désavantagé de jouer en premier. Il risque une mise avant que le second joueur ne mise l'une de ses pièces. Ce désavantage subsiste à chaque fois que le joueur 1 prend son tour. Il risque toujours une autre pièce avant que son adversaire ne risque une des siennes. En conséquence, comme vous pouvez le constater dans le tableau, lorsqu'un jeu moyen se termine, la mise moyenne du joueur 1 est de 4,5 pièces alors que celle du second joueur est de 4 pièces de monnaie.

Étant donné que le joueur 2 gagne huit pièces à chaque fois qu'il en risque 64, il peut s'attendre à un profit de $8/64 = 0,125$ soit 12,5 %. Ce chiffre est comparable à la probabilité de gagner sur une machine à sous d'un casino, mais c'est plus du double de ce qu'un casino peut espérer gagner au jeu de la roulette car il distribue $36/38 = 95\%$ des enjeux et en remporte 5 %. (En réalité, le calcul est un peu plus compliqué car les casinos rétribuent différemment selon que le 0 ou le 00 sort à la roulette, mais les pourcentages sont assez proches.)

Personnellement, je ne joue jamais aux jeux de hasard car, comme ce jeu le démontre, les probabilités sont rarement à l'avantage d'un joueur. Peu importe la chance que vous pensez avoir, les calculs des probabilités auront toujours le mot de la fin.

Imaginez que vous ne connaissiez rien au jeu de la fente magique et qu'un ami vous invite à y jouer. Supposant que votre ami vous dise : « Comme tu es un débutant, je te laisse jouer en premier. » Quel gentil garçon ! Il semble vous faire une faveur. Après tout, vous aurez ainsi la première chance de trouver la fente magique. Mais en fait, c'est un inconvénient, comme nous l'avons vu. De toute évidence, il n'est pas un si bon ami que cela.

Est-il rentable pour quelqu'un d'essayer de gagner de l'argent en jouant au jeu de la fente magique ? Imaginons deux joueurs qui disposeraient de 100 centimes au départ. Du fait que le joueur 2 gagne en moyenne un demi-centime par jeu, il pourrait estimer gagner tout l'argent du second joueur en 200 parties.

Cela demanderait beaucoup de temps. Supposons maintenant que chaque personne prenne deux secondes pour insérer une pièce de monnaie et dix secondes pour retirer les pièces en fin de partie et réinitialiser le jeu pour la partie suivante. Sachant qu'en moyenne, un jeu se termine en huit coups, il durerait presque 30 secondes. 200 jeux dureraient donc 1 heure 40 minutes. C'est bien long pour gagner seulement 1 €.

En revanche, si les mises étaient de 20 centimes au lieu d'un centime, le second joueur pourrait espérer gagner 12 € par heure. Et si les joueurs utilisaient des jetons d'une valeur de 1 € chacun, le second joueur pourrait espérer soutirer 60 € de l'argent de son adversaire chaque heure. (Il devrait bien entendu persuader son adversaire de jouer en premier à chaque partie.)

Une fois encore, le message est clair : faites vos calculs avant de jouer.

Fondamentaux : les autres configurations du jeu

Si le second joueur a 12,5 % de chance dans un jeu de seize pièces, en sera-t-il de même dans un jeu ayant plus ou moins d'emplacements pour les pièces ?

Non, les chances seront différentes. Pour comprendre pourquoi, je vais prendre un exemple extrême.

Supposons un jeu n'ayant que deux fentes, le premier joueur remporte sa pièce s'il gagne et la perd si le second joueur remporte la partie. Le premier joueur ne gagne donc jamais d'argent. En moyenne, il gagnera la moitié des parties et en perdra l'autre moitié. En moyenne, à chaque partie, il pourra espérer perdre une demi-pièce alors que le second joueur pourra espérer gagner une demi-pièce.

En fait, peu importe le nombre de pièces et de fentes (tant qu'il s'agit d'un nombre pair), le joueur 1 perd toujours une demi-pièce par partie et le joueur 2, lui, gagne une demi-pièce. Le fait d'avoir plus de fentes et de pièces ne fait qu'augmenter la durée de chaque partie et le second joueur doit miser davantage pour remporter cette demi-pièce. Un jeu avec davantage de fentes aide à mieux dissimuler l'avantage dont bénéficie le second joueur. Dans un jeu à deux fentes, cela paraît évident mais dans un jeu à 16 fentes, cela l'est beaucoup moins !

Et avec un microcontrôleur ?

Oui, un microcontrôleur conviendrait à ce jeu, mais je ne suis pas convaincu qu'il serait plus simple. Votre microcontrôleur aurait vraisemblablement moins de 16 sorties pour activer les fentes. Vous pourriez n'utiliser que quatre sorties pour générer un code binaire de 0000 à 1111, mais vous auriez toujours besoin d'un décodeur et d'un multiplexeur analogique ou d'un démultiplexeur.

En considérant le coût additionnel du microcontrôleur et le temps nécessaire à l'écriture du programme, je pense que cette expérience est de celles où l'utilisation de composants discrets est plus avantageuse.

Logiquement audible

Pour cette expérience, je veux rompre avec les problèmes de logique et les probabilités. Je vais vous montrer comment réaliser quelque chose d'amusant, d'étrange mais simple (bien que plus tard, dans ce livre, je trouverai comment le compliquer). Je vais vous apprendre comment transmettre des signaux audio-phoniques au travers de circuits intégrés logiques.

Fondamentaux: le thérémine

Il y a bien longtemps, aux premiers jours de l'électronique, un gadget appelé thérémine générait des sons à faire froid dans le dos, destinés aux pistes sonores des films d'horreur. Le thérémine était joué par un instrumentiste qui faisait des vagues avec ses mains, autour de deux tiges qui étaient sensibles aux variations de capacité entre l'instrument et le sol. Un interprète expérimenté pouvait jouer des mélodies connues à l'aide de sons ressemblant à la vibration d'une scie musicale frottée par archet.

Vous trouverez des explications complètes sur le fonctionnement du thérémine sur Internet. Vous pouvez également vous procurer des fichiers MP3 d'interprétations au thérémine et un kit pour en construire un vous-même.

Quand vous avez utilisé un phototransistor pour contrôler la fréquence d'un timer 555 dans la troisième expérience, le résultat ressemblait au son d'un thérémine. Maintenant que vous êtes familiarisé avec l'utilisation des circuits intégrés logiques, vous pouvez mettre à profit ces connaissances pour mélanger deux (ou plus) fréquences audio, comme le ferait un superthérémine.

Audiophonie logique

Vous pensez peut-être que la présence d'un circuit intégré logique dans un circuit audio est totalement inappropriée, mais rappelez-vous ces trois paramètres.

1. Les fréquences audio qui s'étendent de 20 Hz à 15 kHz sont très lentes du point de vue d'un circuit intégré logique prévu pour accepter des fréquences supérieures à 1 MHz.
2. Les signaux carrés générés par un temporisateur ne seront jamais aussi doux et mélodieux qu'un signal sinusoïdal mais ils sont audibles.
3. La musique conventionnelle est déjà numérique. La plupart des musiques que vous écoutez depuis un CD ou un lecteur MP3 sont créées et traitées par échantillonnage digital.

XOR audible

Sur la fig. 22-1 page suivante, vous apercevez un circuit quelque peu similaire à celui de la fig. 5-1. La différence majeure étant les sorties des timers maintenant reliées à une porte XOR dont la sortie est reliée à un haut-parleur, à travers un transistor. Il s'agit en effet d'une configuration très inhabituelle mais tous les composants fonctionnent en respectant leurs spécifications et je pense que le résultat est intéressant.

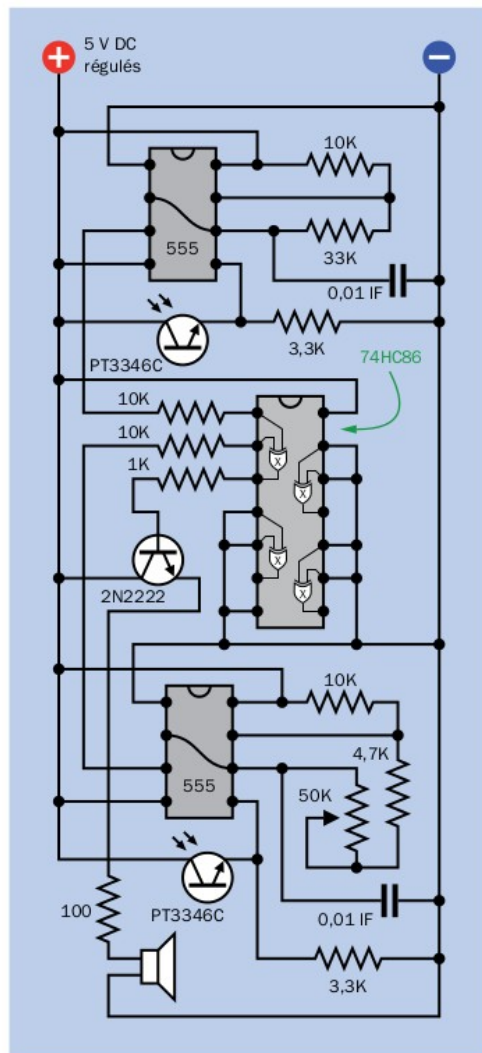


Figure 22-1. Schéma d'un circuit mixant les deux fréquences d'un timer à l'aide d'une porte XOR.

Assembler ces composants ne devrait pas vous prendre beaucoup de temps. Découvrez ma réalisation sur la fig. 22-2.

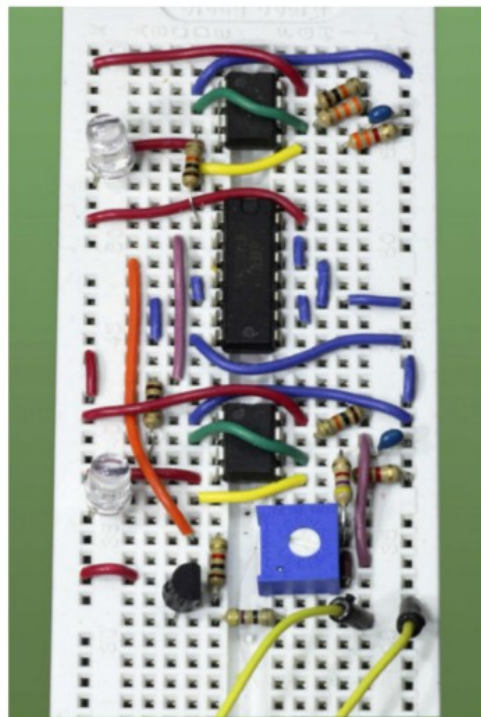


Figure 22-2. Réalisation sur plaque de montage du schéma précédent.

Si vous n'avez commis aucune erreur de câblage, vous devriez entendre toutes sortes de sonorités quand vous modifiez la lumière atteignant les phototransistors tout en faisant varier le potentiomètre ajustable de 50K dans un sens et dans l'autre. Que se passe-t-il ?

Tout se mélange

Rappelez-vous comment fonctionne une porte logique XOR. Sa sortie est haute quand une de ses entrées est au niveau haut mais pas l'autre. De ce fait, lorsque vous lui injectez deux signaux audio, la sortie d'un XOR est active quand les signaux sont déphasés mais, si les signaux sont en phase, la sortie reste au niveau bas.

La fig. 22-3 illustre ce fonctionnement pour un XOR, mais également pour des portes AND et OR. Le brochage du circuit intégré quadruple AND à deux entrées 74HC08, celui du quadruple OR à deux entrées 74HC32 et celui

du quadruple XOR à deux entrées 74HC86 étant identiques, vous n'avez rien à modifier dans votre câblage pour écouter les différents effets sonores obtenus en changeant de circuit intégré.

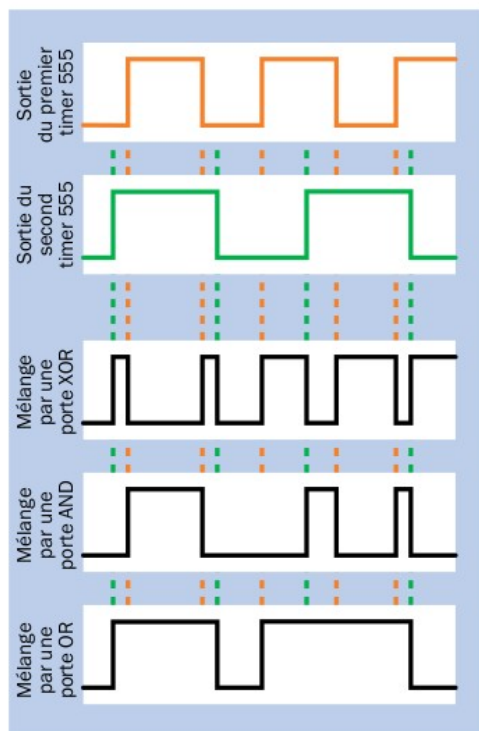


Figure 22-3. Quand les niveaux de deux fréquences audibles se superposent dans différents circuits logiques, ils produisent des effets sonores contrastés.

La porte OR génère une sortie quand l'un des timers émet une impulsion alors que, la porte AND, plus capricieuse, ne réagit que lorsque les deux timers ont une sortie haute. À mon avis, la porte XOR est la plus intéressante, c'est pourquoi je vous ai conseillé de l'essayer en premier.

Vous pouvez facilement imaginer d'autres options. Vous pourriez, par exemple, remplacer la résistance de 33K par un second potentiomètre de 50K, mais en ajoutant une résistance de 4,7K en série afin d'éviter de court-circuiter à la masse la broche 6 du timer en

réglant le potentiomètre au minimum. Cela serait difficile à endurer pour un timer 555, aussi robuste soit-il.

Vous pouvez augmenter la valeur de R1 par rapport à celle de R2 sur l'un ou les deux circuits intégrés 555 afin d'allonger la durée du niveau haut par rapport à celle du niveau bas. Cela semble intéressant dans le cas d'un XOR qui a tendance à découper les périodes en impulsions plus courtes. Que se passe-t-il par exemple si vous remplacez la résistance de 33K par une de 470K ? Ou même en lui préférant une résistance de 1M ou plus ?

Quand le premier timer oscille plus lentement que le second, vous pouvez réellement entendre les fréquences interagir. Lorsque vous utilisez la résistance de 1M, remplacez le condensateur de 0,01 μF du premier timer par un condensateur de 0,1 μF . Vous entendrez alors un son variable à deux tons. Si vous dessinez les deux signaux de sortie des temporisateurs 555, vous comprendrez pourquoi.

Pouvez-vous imaginer des applications de ce circuit ? Ce pourrait être, par exemple, la voix d'un robot qui serait modifiée selon sa position, exposant les phototransistors à divers flux lumineux. Orientez les phototransistors dans différentes directions afin de renforcer les effets. Vous pourriez également retirer les phototransistors et ajuster uniquement les potentiomètres pour déterminer le son optimal produit par tout autre projet électronique.

Que se passerait-il en dupliquant ce circuit et en reliant les sorties des portes XOR de chacun à un autre XOR ? Je vous laisse explorer les possibilités de ce type.

Il y a une raison cachée à cette expérience. Je vais utiliser le principe dans l'expérience 26 dans un but totalement différent : créer des salves d'impulsions *visibles*.

Un projet casse-tête

Voici une autre expérience relativement simple utilisant des portes logiques réalisant un jeu à deux joueurs qui semble facile – jusqu'à ce que vous y jouiez. Comme pour le jeu de la fente magique, j'y reviendrai ultérieurement dans ce livre. Dans l'expérience 32, je suggérerai des moyens d'améliorer les interactions de l'utilisateur en abordant le monde des capteurs. Pour le moment, le jeu se jouera à l'aide de boutons-poussoir.

Fondamentaux: le roi anglais des énigmes

Bien avant l'arrivée de la télévision, et même de la radio même, les journaux britanniques avaient pour habitude de distraire leurs lecteurs à l'aide de petits jeux et de casse-têtes. Ils étaient beaucoup plus difficiles que les mots croisés actuels.

Le roi anglais des créateurs d'énigmes était Henry Ernest Dudeney, un maître dans l'art de poser des questions dans un court paragraphe, mais qui demandaient des jours, voire des semaines, pour y répondre.

De nombreux problèmes étaient géométriques ou arithmétiques. Par exemple, il lançait le défi à ses lecteurs de trouver les deux facteurs premiers du nombre 11 111 111 111 111 111 et ainsi de suite, en utilisant uniquement un crayon et du papier. Dudeney était capable de donner la bonne réponse. (Même en utilisant un ordinateur, ce problème n'est pas évident, vu la grandeur des nombres.)

Voici un autre exemple des fameuses énigmes de Dudeney : « Un client demande à son fournisseur de lui fabriquer une fenêtre de 60 cm de côté. La fenêtre devra être divisée en huit panneaux. Chaque côté d'un panneau devra mesurer 30 cm et il ne devra pas y avoir d'espaces vides. Cela paraît impossible, et pourtant c'est faisable. Mais comment ? »

Pour connaître la réponse, allez à la section « Solution de l'énigme » page 182. Mais auparavant, essayez de la résoudre vous-même. Un indice : la solution est dans les termes utilisés pour l'énoncé du problème.

Déplacements de pions

Dudeney appréciait particulièrement ce qu'il avait baptisé des *moving counter problems*, des problèmes à résoudre par déplacements de pions. Le jeu de dames en fait évidemment partie, puisque les pions se déplacent tout autour du plateau jusqu'à ce qu'un des joueurs gagne. En revanche, le jeu de morpion n'en est pas un, car les symboles utilisés restent figés sur la feuille de papier, mais il peut le devenir, ce qui le rend beaucoup plus intéressant. Dudeney nomme cette variante « le jeu d'Ovide », car il disait l'avoir vu mentionné dans les écrits du poète. Vrai ou faux, peu importe. En tout cas, la stratégie du jeu est subtile, alors que les règles sont très simples.

- Le jeu se joue à deux, chacun disposant de trois pions. Les pions d'un joueur sont colorés différemment de ceux de son adversaire.
- Le plateau de jeu est constitué de neuf cases carrées, comme sur une grille de morpion.
- Les participants jouent en plaçant leurs pions un par un, à chaque tour, n'importe où sur la grille.

- Une fois que les trois pions de chaque joueur ont été placés, les joueurs jouent en déplaçant leurs pions. Un déplacement consiste à faire glisser un pion vers une case vide adjacente. Les déplacements en diagonale ne sont pas autorisés.
- Un joueur gagne s'il aligne trois pions horizontalement, verticalement ou en diagonale.
- La case du centre étant importante dans ce jeu, le premier joueur ne peut pas placer son pion dans la case centrale, au premier tour.

La dé du jeu consiste à placer vos pions de façon à contrer votre adversaire. Rappelez-vous que vous avez le droit de déplacer vos pions, mais vous n'êtes pas autorisé à sauter par-dessus un pion de votre adversaire, ni à vous déplacer de plus d'une case à la fois.

Sur la fig. 23-1, par exemple, si c'est au tour du joueur blanc, il devrait déplacer son pion de la case 6 vers la 5 afin de bloquer deux des pions noirs. Le joueur noir n'a maintenant plus aucun moyen d'empêcher les blancs de gagner en effectuant un déplacement de la case 3 à la case 6. Fin de partie !

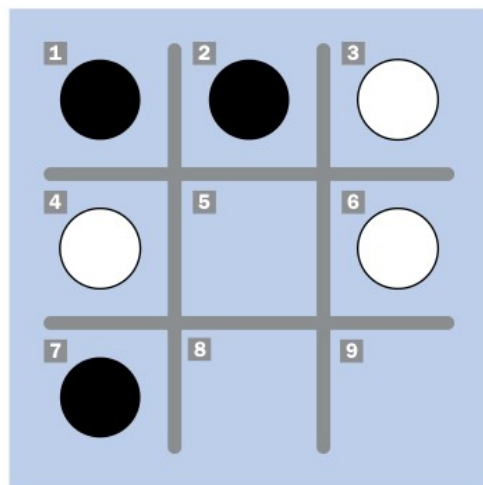


Figure 23-1. Représentation d'une situation hypothétique du jeu d'Ovide.

Mais supposons que ce soit au tour des noirs. Dans ce cas, le joueur devrait déplacer son pion de la case 2 vers la 5 pour empêcher les blancs d'occuper cette case. À

l'issue de ce mouvement, le résultat du jeu est difficile à prévoir.

Je ne sais pas comment construire un montage suffisamment élaboré pour jouer à ce jeu, mais je peux vous montrer un circuit qui détecte si un joueur a gagné. Ce circuit conviendrait également au jeu de morpion que j'imagine trop simple pour intéresser mes lecteurs.

Vous penserez peut-être qu'un circuit qui détecte une combinaison gagnante n'est pas nécessaire car tout le monde peut voir si trois pions sont alignés. C'est vrai, bien entendu ! Mais il est amusant d'entendre un signal audible quand on gagne, et un tel circuit suscitera la curiosité. Comment fonctionne-t-il ?

La grille logique

La première question à résoudre est la façon de traiter les interactions des joueurs. Comment un circuit électronique peut-il détecter si quelqu'un déplace un pion ? La réponse la plus simple consiste à remplacer les pions des deux couleurs, par des interrupteurs de deux sortes différentes (un pour chaque joueur), dans chaque case du plateau.

Au début d'une partie, les joueurs jouent tour à tour en fermant les interrupteurs jusqu'à ce que chacun ait basculé trois interrupteurs. Ensuite, chaque déplacement consiste à ouvrir un interrupteur et en fermer un autre présent sur une case adjacente. Vous n'êtes, bien entendu, pas autorisé à basculer un interrupteur dans une case déjà occupée par votre adversaire.

Des poussoirs à verrouillage (type nécessitant un appui pour les activer et un autre appui pour les désactiver) semblent parfaits pour cet usage. Une LED de couleur située à côté de chaque poussoir (par exemple une bleue pour un joueur et une rouge pour l'autre), aiderait à voir qui occupe une case. Sur la fig. 23-2, j'ai représenté ce que j'ai en tête.

On pourrait alternativement, utiliser des interrupteurs à trois positions (fermé - ouvert - fermé), la position ouverte étant au centre. Chaque joueur occuperait une case en basculant l'interrupteur vers lui et une case serait libre quand l'interrupteur serait en position centrale. Vous pouvez vous procurer de tels interrupteurs qui sont peu coûteux et, chacun ayant trois positions, vous n'aurez besoin que de neuf au lieu des dix-huit poussoirs.

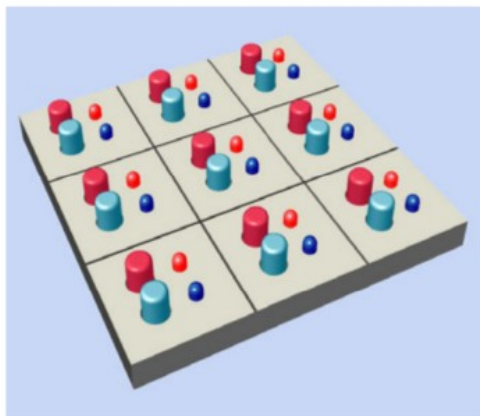


Figure 23-2. Solution simple pour transmettre les interactions des joueurs à l'électronique du jeu d'Ovide, en utilisant des poussoirs à verrouillage et des LED pour chacun des joueurs.

Utilisez des circuits logiques

Imaginons comment utiliser des portes logiques pour détecter un déplacement gagnant. Comme d'habitude, je commence par décrire la logique par des mots. Si les cases sont numérotées de 1 à 9, comme sur la fig. 23-1, je peux énoncer le problème de la manière suivante.

« Le joueur gagnant doit occuper les cases 1 et (AND) 2 et (AND) 3, ou (OR) 4 et (AND) 5 et (AND) 6, ou (OR) 7 et (AND) 8 et (AND) 9, ou (OR) 1 et (AND) 4 et (AND) 7, ou (OR) 2 et (AND) 5 et (AND) 8, ou (OR) 3 et (AND) 6 et (AND) 9, ou (OR) 1 et (AND) 5 et (AND) 9, ou (OR) 3 et (AND) 5 et (AND) 7. »

Si vous avez lu ce livre depuis le début, vous avez acquis une pratique suffisante pour convertir ce type de phrase en un ensemble de portes logiques. Comme vous pouvez le constater, il existe huit combinaisons gagnantes réunies par des portes OR, chacune de ces combinaisons résultant de trois conditions connectées à des circuits AND. Pouvez-vous en représenter le diagramme logique ? Le concept de base est exposé sur la fig. 23-3 et le diagramme logique complet, comprenant les interrupteurs, est présenté sur la fig. 23-4 page suivante.

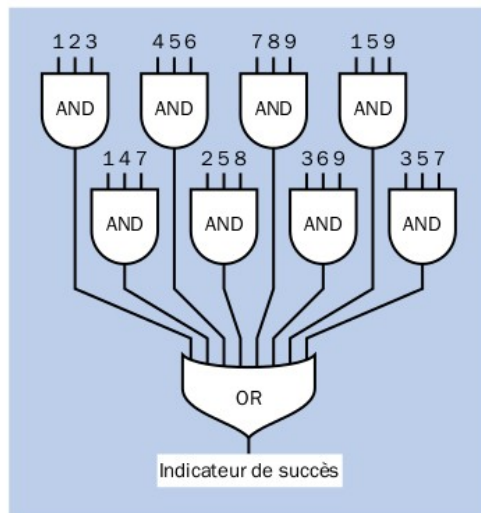


Figure 23-3. Squelette logique du jeu d'Ovide. Chaque chiffre relié à l'entrée d'une porte AND représente la case d'un plateau comportant 3 × 3 emplacements où un pion de chaque joueur est placé.

Remarquez la porte OR à huit entrées en bas du schéma. Un tel circuit existe-t-il ? Oui, il existe, ce n'est pas un problème. De même, les portes AND à trois entrées se trouvent facilement. De combien de circuits aurez-vous besoin ? Il existe huit possibilités de gagner, cela signifie huit portes AND à trois entrées. Il y a trois de ces portes dans un circuit intégré à 14 broches, trois composants seront donc nécessaires.

Cela permet de détecter la victoire d'un seul joueur. Pour l'autre joueur, il faudra un ensemble d'interrupteurs et de circuits logiques supplémentaires. Si, toutefois, vous voulez simplifier votre travail, prévoyez un commutateur indiquant quel joueur joue afin de relier les interrupteurs le représentant à un jeu unique de portes logiques. Je ne suis pas sûr de préférer une solution à l'autre, alors, laissez-moi vous proposer une autre solution.

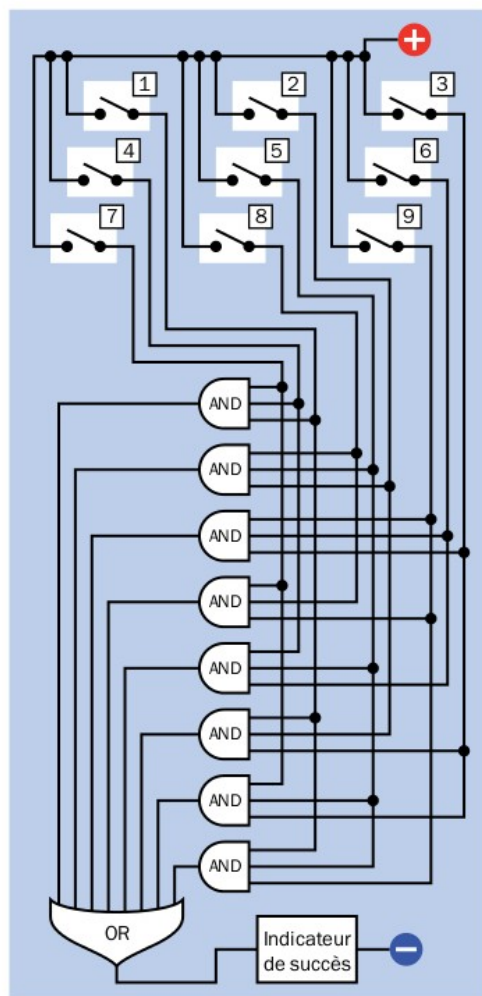


Figure 23-4. Diagramme logique du jeu d'Ovide avec les interrupteurs représentant les pions qu'un joueur place sur le plateau.

Le jeu d'Ovide commuté

Le jeu d'Ovide (ou le morpion) est idéal pour être réalisé à partir d'interrupteurs multipolaires, sans utiliser de portes logiques. Vous devez maintenant être capable de concevoir un tel circuit par vous-même, mais je vais vous montrer celui auquel j'ai abouti sur la fig. 23-5. (Pouvez-vous en déduire une version plus simple ?)

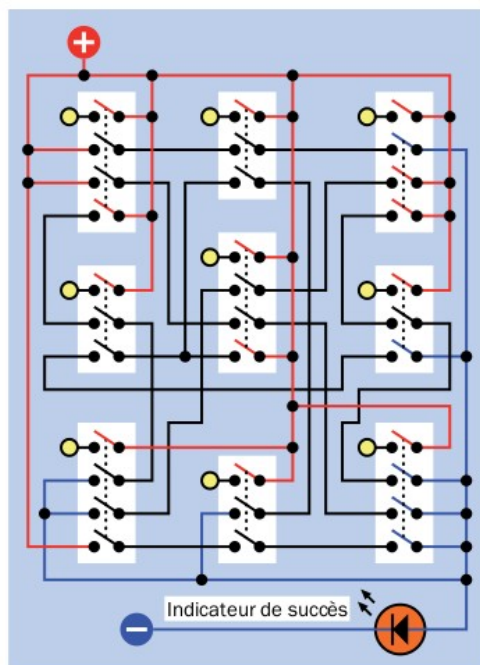


Figure 23-5. Le jeu d'Ovide peut être réalisé sans porte logique, en utilisant des interrupteurs.

Pour comprendre comment cela fonctionne, imaginez qu'un des interrupteurs est fermé et suivez le cheminement du courant issu du pôle positif de l'alimentation, à travers les autres interrupteurs et jusqu'à la masse. C'est en réalité plus simple qu'il n'y paraît a priori.

Les LED, représentées par de petits cercles jaunes, confirmeront quel interrupteur est activé. Ils devront naturellement être reliés à la masse, mais j'ai volontairement omis ces liaisons afin de simplifier le schéma.

Comme vous le constatez, les interrupteurs doivent avoir trois ou quatre pôles. Je peux réaliser le circuit en utilisant des interrupteurs bipolaires mais cela obligerait à retirer les petites diodes LED.

Des interrupteurs 4PDT à verrouillage qui feront l'affaire ; vous pouvez vous les procurer pour un coût raisonnable. La grosse diode LED, en bas du schéma, s'illumine quand le joueur a pu activer trois interrupteurs alignés.

Un ensemble de 9 interrupteurs est nécessaire pour chaque joueur, soit un total de 18, comme imaginé sur la fig. 23-2.

Préférez-vous la version du jeu réalisée avec des circuits intégrés logiques ou celle utilisant des interrupteurs ?

Vous savez que la meilleure solution pour détecter la position des pions déplacés sur le plateau du jeu serait d'utiliser des capteurs. J'y reviendrai plus tard mais, en attendant, je crois que vous en savez assez pour réaliser ce jeu vous-même. Vous pouvez utiliser des interrupteurs avec des portes logiques pour ce circuit. Vous pourrez ensuite le modifier en utilisant des capteurs.

Pour aller plus loin

Je l'ai déjà dit précédemment, je ne sais pas comment réaliser un circuit assez sophistiqué pour jouer à ce jeu. En revanche, je pense pouvoir y parvenir en utilisant un programme. Un microcontrôleur typique a relativement peu de mémoire, mais le jeu d'Ovide a suffisamment peu de possibilités pour chaque déplacement qu'un programme pourrait y arriver en suivant quatre règles, par ordre de priorité. Celles-ci indiqueraient au microcontrôleur ce qu'il doit faire (vous pourrez d'ailleurs le vérifier en les appliquant vous-même, quand vous jouez avec une autre personne).

- Si vous pouvez déplacer un pion qui permet d'aligner vos trois pions, faites-le. Sinon,
- Si votre adversaire peut déplacer un pion qui aligne ses trois pions, essayez de le bloquer. Sinon,
- Si vous pouvez déplacer un pion vers la case centrale, faites-le. Sinon,
- Déplacez un pion au hasard vers une case vide. Si ce n'est pas possible, il y a match nul et la partie est terminée.

Ce programme ne gagnerait pas beaucoup de parties, mais il fonctionnerait. Le problème serait de représenter le plateau du jeu et les pions en langage informatique, ce qui requiert l'utilisation de tableaux de nombres entiers. Avec un Arduino, en langage C, il n'y a pas de contrôle de débordement permettant d'être certain de rester dans les limites d'un tableau de nombres, ainsi que d'autres particularités que je n'apprécie pas trop.

Même aujourd'hui, les microcontrôleurs sont moins puissants, moins interactifs et offrent moins de contrôle d'erreurs que l'ancien PC junior d'IBM avec lequel j'avais l'habitude de concevoir des jeux en langage Basic Microsoft dans les années 1980. Quel triste état de fait !

Mon ami Fredrik Jansson, un physicien finlandais qui m'a aidé à vérifier le contenu de ce livre, me confiait que vous pourriez créer le jeu d'Ovide à l'aide d'un microcontrôleur en utilisant un ordinateur de bureau pour la préparation initiale. Fredrik a déterminé qu'il existait 1 680 positions possibles sur le plateau du jeu pour trois pions blancs et trois pions noirs. Étant donné qu'une position est logiquement identique si les pions noirs et les pions blancs sont inversés, il n'y a en fait que 840 positions logiques différentes. Cette quantité est suffisamment faible pour qu'un ordinateur puisse examiner chaque jeu possible et déterminer le meilleur déplacement à faire dans chaque situation.

Si vous utilisez un ordinateur pour créer une table contenant l'ensemble des meilleurs déplacements possibles, vous pouvez charger ce tableau dans la mémoire limitée d'un microcontrôleur. Fredrik a déterminé que quatre bits seulement suffisaient pour chacun des déplacements recommandés : deux bits pour sélectionner un pion et deux bits pour lui indiquer le déplacement, vers le bas, le haut, à gauche ou à droite. Ainsi, les instructions pour jouer 840 positions logiques tiendraient dans 420 octets. Vous auriez également besoin de quelques instructions supplémentaires pour réaliser le placement initial des trois jetons de chaque couleur mais ce programme reste réalisable. Après chaque déplacement de son adversaire humain, le microcontrôleur parcourt sa table pour repérer le déplacement recommandé, précédemment défini par son puissant cousin, l'ordinateur de bureau.

Si vous décidez d'essayer cette stratégie de programmation, ou une autre, je vous remercie de me faire connaître le résultat.

Solution de l'énigme

La solution de l'énigme de la fenêtre de Dudeney se trouve sur la fig. 23-6 page suivante. La fenêtre mesure 60 cm de chaque côté, et chaque panneau triangulaire mesure 30 cm de chaque côté. Ce plan satisfait les critères du problème. Mais rassurez-moi – vous n'aviez tout de même pas imaginé que la fenêtre devait être carrée et que chaque panneau devait posséder quatre côtés ?

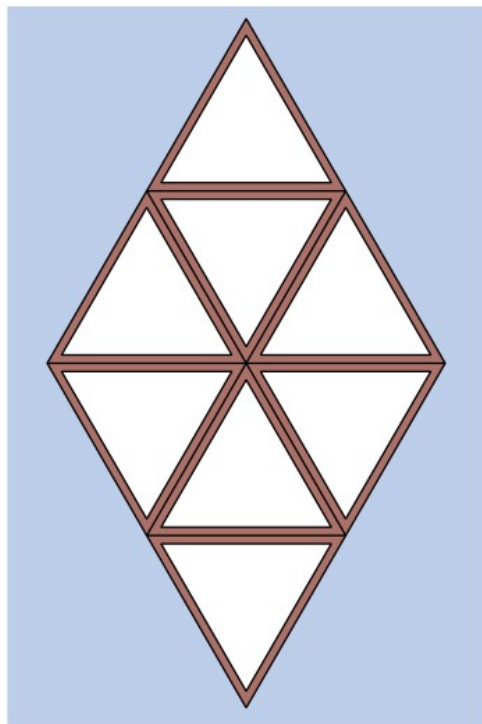


Figure 23-6. Solution du problème posé au début de cette expérience.

Si vous aimez ce genre de casse-tête, que ce soit pour vous distraire ou embarrasser vos amis, il y a deux volumes répertoriant les créations de Dudeney : *The Canterbury puzzles* et *Puzzles and Curious Problems*. Ayant été publiés il y a très très longtemps, ces ouvrages (en anglais) sont dans le domaine public et vous pouvez les lire gratuitement (et légalement) sur le site du Projet Gutenberg.

Si vous souhaitez vous entraîner contre un ordinateur, vous pouvez également obtenir le jeu d'Ovide sous la forme d'une application Android. Mais, je pense que réaliser quelque chose par vous-même serait plus intéressant.

Avant de quitter les circuits logiques pour d'autres domaines, je n'aurais pas rempli consciencieusement ma tâche si je ne vous présentais pas l'application la plus fondamentale : l'addition des nombres. Certes, vous avez sûrement une calculatrice, qui est bien plus puissante que tous les circuits que vous pourrez construire par vous-même. Mais je pense malgré tout qu'il y a quelque chose de magique dans cette expérience, où vous allez créer un circuit capable d'effectuer des calculs élémentaires.

Les cinq règles du calcul binaire

Les circuits logiques n'ayant que deux états – bas et haut – ils sont parfaits pour représenter les 0 et 1 du code binaire. Pour réaliser un circuit qui ajoute des nombres, vous devez donc mettre en œuvre l'addition binaire. La bonne nouvelle, c'est qu'il n'y a que cinq règles à connaître pour additionner des nombres binaires, trois d'entre elles étant évidentes. Commençons par elles.

- Règle 1 : $0 + 0 = 0$
- Règle 2 : $0 + 1 = 1$
- Règle 3 : $1 + 0 = 1$

Je pense que vous ne rencontrerez aucune difficulté avec ces règles. Voyons maintenant la quatrième, qui est un peu plus délicate.

- Règle 4 : $1 + 1 = 10$ (binaire)

Si vous lisez « un plus un égale dix », ce n'est pas correct. Vous devez oublier votre habitude de pensée basée sur le système décimal ! Le mot « binaire » utilisé dans la quatrième règle précise que 10 n'a rien à voir avec « dix » ; il s'agit ici d'un nombre binaire.

Vous savez tous que $1 + 1 = 2$, alors pourquoi ne pas écrire 2 en résultat ? Simplement parce qu'en binaire, il n'y a que des 0 et des 1. Appliquons alors la règle 5.

- Règle 5 : quand votre résultat vaut 2 (décimal), écrivez 0 et reportez 1 sur l'emplacement immédiatement à gauche dont le poids vaut deux.

La notion de poids a déjà été abordée dans ce livre, quand j'ai évoqué les valeurs d'entrée binaires, dans les décodeurs par exemple. Dans le système binaire, le chiffre 1 placé le plus à droite du nombre a un poids de 1, 2 (décimal) immédiatement à sa gauche, 4 à la position suivante à gauche, 8 pour la position suivante et ainsi de suite.

Donc $1 + 1 = 10$ signifie en réalité que le résultat n'a pas de valeur à la position la plus à droite et une valeur de 2 à l'emplacement suivant à gauche.

Les quatre combinaisons possibles, quand on additionne deux chiffres binaires, sont indiquées sur la fig. 24-1.

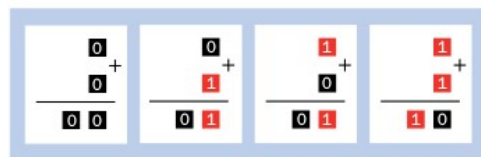


Figure 24-1. Règles de base de l'addition binaire de deux nombres binaires de 1bit.

Observez maintenant la fig. 24-2 page suivante, les mêmes règles s'appliquent lorsque l'on manipule deux nombres binaires de deux bits. Ce croquis montre toutes les combinaisons possibles de deux nombres de deux bits.

Il n'y a qu'une situation qui peut paraître obscure. Que se passe-t-il exactement quand on additionne $11 + 11$ en binaire ?

Comme toujours, commençons par l'emplacement le plus à droite. Additionnons $1 + 1$ et écrivons 0 puis nous reportons une retenue de 1 à gauche. Dans cet emplacement, il y a déjà $1 + 1$ qui attendent d'être additionnés. Nous devons donc additionner $1 + 1 + 1$.

En fait nous savons déjà que $1 + 1 = 10$ en système binaire. Donc en ajoutant à nouveau 1, nous obtenons 11 en binaire. Cet exemple est repris sur la fig. 24-2.

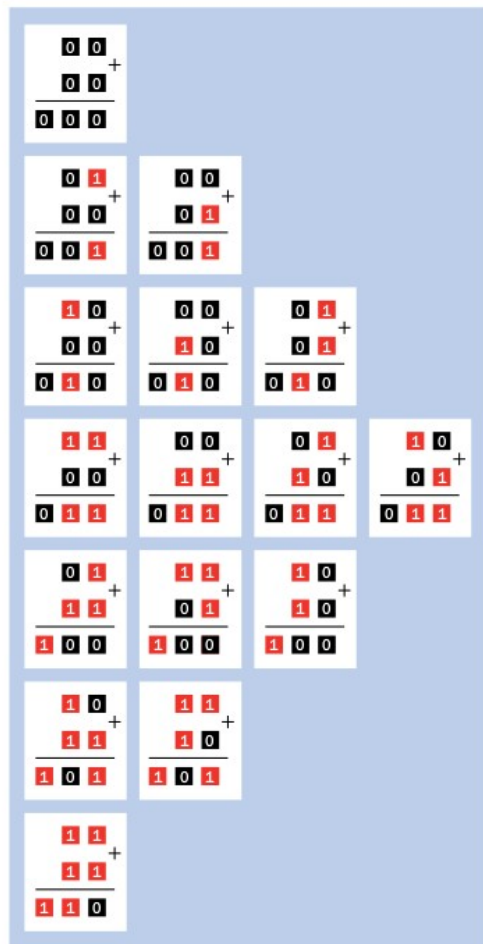


Figure 24-2. Règles de base de l'addition de deux nombres binaires de 2 bits.

Des bits aux états logiques

Assez parlé des règles d'arithmétique binaire. Vous connaissez maintenant tout ce qui est nécessaire pour réaliser un additionneur binaire (au cas où les nombres binaires ne vous sont pas familiers, je vous montrerai comment les convertir en nombres décimaux au cours de la prochaine expérience).

Voyons maintenant comment recourir à des circuits logiques pour suivre les règles du système binaire, en utilisant l'état haut pour représenter le 1 et l'état bas pour le 0. Je peux réécrire les quatre premières règles en utilisant des mots plutôt que des nombres, comme ceci :

- entrée basse + entrée basse = sortie basse
- entrée basse + entrée haute = sortie haute
- entrée haute + entrée basse = sortie haute
- entrée haute + entrée haute = sortie basse (et une retenue haute immédiatement à gauche)

Qu'est-ce que cela vous rappelle ? Eh bien, si nous oublions la « retenue » pour un instant, c'est exactement la définition des entrées et sorties d'une porte XOR. Appliquons simplement les deux chiffres à ajouter en tant que niveaux haut et bas aux entrées d'une porte XOR et la sortie de cette porte sera la somme des deux chiffres. Vérifions cela en plaçant une LED indiquant 0 quand elle est éteinte et 1 si elle est allumée.

Maintenant, comment pouvons-nous reporter la retenue à gauche ? Je pourrais énoncer :

- entrée haute + entrée haute = retenue haute
- toute autre combinaison = retenue basse

À nouveau, à quoi cela vous fait-il penser ? Une porte AND bien entendu ! Si les entrées sont ainsi reliées, la sortie peut piloter une LED indiquant la retenue.

La fig. 24-3 présente les portes interconnectées pour réaliser l'addition de deux digits binaires quelconques que j'ai appelés arbitrairement A et B. La fig. 24-4 montre les quatre combinaisons possibles des entrées et les états correspondants des sorties, le rouge indiquant un 1 et le noir, un 0.

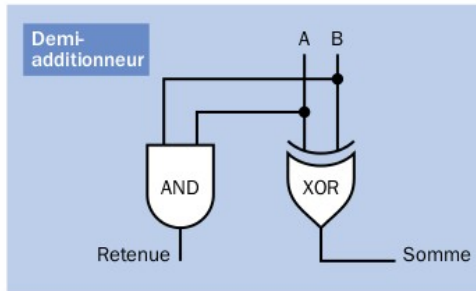


Figure 24-3. Configuration simple pour additionner deux digits binaires et générer si nécessaire une retenue, utilisant une porte XOR et une porte AND.

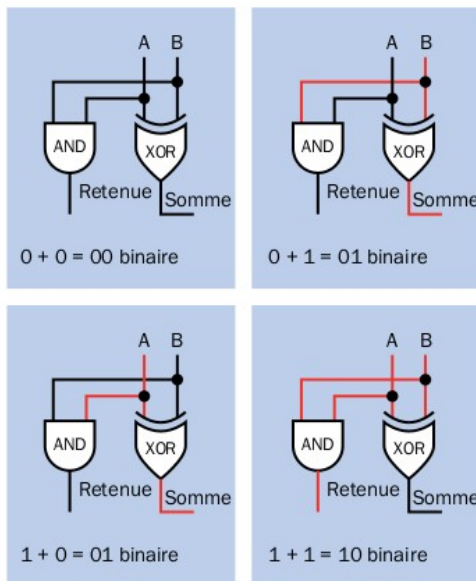


Figure 24-4. Représentation des quatre combinaisons possibles des entrées d'un demi-additionneur et de la valeur de sortie. Le rouge représente la valeur 1 et le noir, la valeur 0.

Ce circuit très simple s'appelle un « demi-additionneur ». Il ne peut être utilisé que pour additionner les digits les plus à droite d'un nombre binaire, car il ne prend pas en compte une éventuelle retenue qui lui serait fournie par le digit précédent qui serait à sa droite.

Que se passe-t-il, en revanche, si un digit plus à droite peut générer une retenue ? Comment faire ? Nous avons besoin d'un « additionneur complet ».

C'est un peu plus délicat. On ne sait comparer que deux entrées en utilisant une porte XOR alors que l'on a trois chiffres binaires à traiter : deux chiffres binaires en entrée et une retenue (qui peut valoir 0 ou 1) provenant de l'addition de la position précédente. Nous pouvons trouver nous-mêmes comment traiter $1 + 1 + 0$ ou $0 + 1 + 1$ ou toute autre combinaison jusqu'à $1 + 1 + 1$.

Pour y parvenir, il est nécessaire de scinder le traitement en deux étapes, comme sur la fig. 24-5. Vous remarquerez qu'il s'agit en fait de deux demi-additionneurs constitués avec des portes XOR et AND et d'une porte OR qui « génère une retenue si l'un OU l'autre des demi-additionneurs en génère une ».

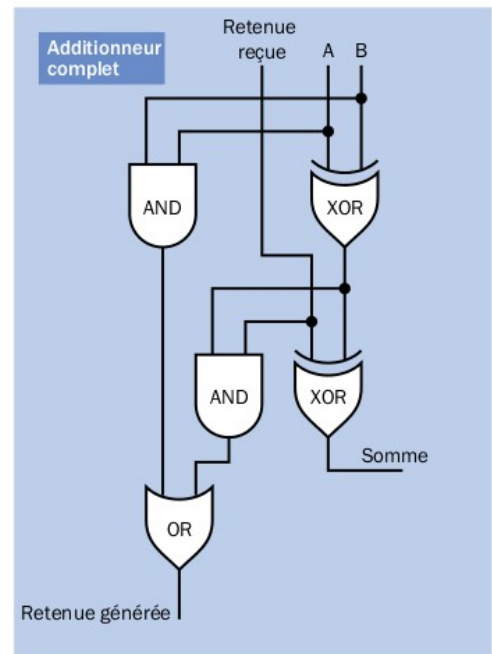


Figure 24-5. Un additionneur complet reçoit une retenue du circuit traitant la position précédente et l'ajoute aux deux digits de la position en cours.

Le premier XOR ajoute les deux chiffres d'entrée, comme précédemment. On prend ensuite la sortie du premier XOR et on l'ajoute à la retenue provenant de l'étage précédent. Pour cela, il faut un second XOR à la suite du premier. Il y aura ensuite deux cas où l'additionneur devra générer une retenue vers l'étage suivant :

1. Si nous avons 1 ET (AND) 1 en entrée, auquel cas on génèrera une retenue à l'aide de la première porte AND comme d'habitude ;

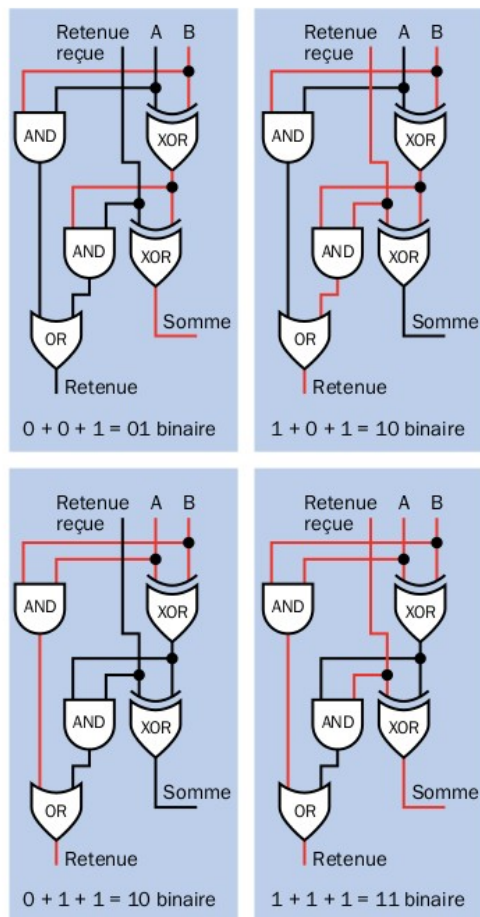


Figure 24-6. Les trois entrées d'un additionneur peuvent prendre huit états différents. Quatre combinaisons sont illustrées pour expliquer le fonctionnement d'un additionneur.

2. OU (OR) si la sortie de la première porte XOR est 1, ET (AND) que nous avons une retenue provenant de l'étage précédent.

Il existe huit combinaisons possibles pour deux entrées et une retenue reçue. Quatre de ces combinaisons sont représentées, à titre d'exemple, sur la fig. 24-6.

Vous êtes maintenant presque prêt à réaliser votre propre additionneur. Permettez-moi, cependant, une petite digression préalable.

Fondamentaux: l'option NAND

Selon la façon dont on les relie, les portes logiques peuvent se comporter de manière identique les unes aux autres, la combinaison XOR/AND n'est pas la seule à même de réaliser un additionneur. Je l'ai choisie car je pense que c'est la plus aisée à comprendre, mais des portes NAND sont couramment utilisées. Cette alternative requiert davantage de portes logiques (cinq au lieu de deux pour réaliser un demi-additionneur, et neuf au lieu de cinq pour un additionneur complet), mais avec le gros avantage de ne nécessiter que des portes NAND à même de réaliser toutes les fonctions attendues. Un calculateur ne comportant que des portes NAND est plus facile à construire, c'est pourquoi les portes NAND sont souvent considérées comme fondamentales dans les ordinateurs. Elles portent la référence 7400 dans la grande famille des circuits intégrés 74xx.

Un demi-additionneur utilisant cinq portes NAND est représenté sur la fig. 24-7, tandis que la fig. 24-8 montre un additionneur constitué de neuf portes. À nouveau, l'additionneur complet est composé de deux demi-additionneurs emboîtés.

Si vous êtes méthodique et patient, vous pouvez imprimer plusieurs copies de ces schémas et utiliser un crayon rouge pour tracer les états des liaisons afin de vérifier l'exactitude des sorties correspondant aux huit combinaisons possibles d'entrée. Personnellement, je ne le ferai pas et préfère en rester à la configuration utilisant des portes XOR et AND, l'autre me donnant quelques maux de tête.

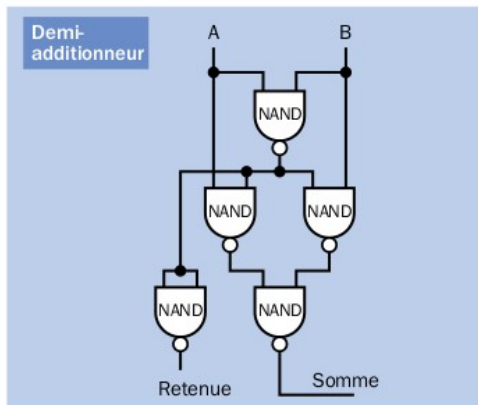


Figure 24-7. Un demi-additionneur peut ne comporter que des portes NAND.

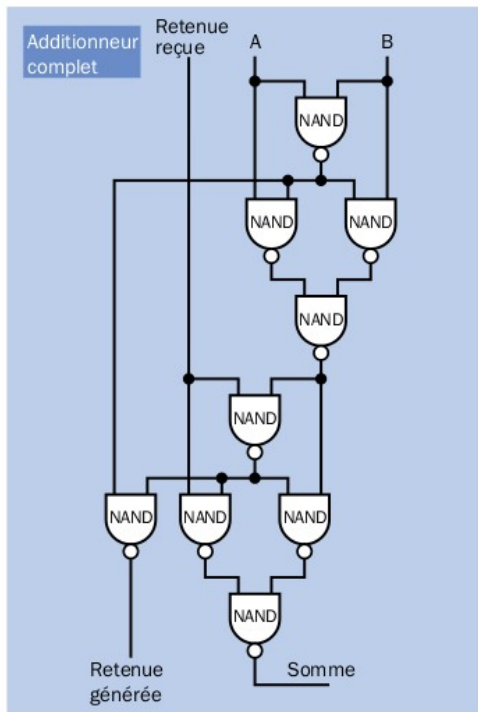


Figure 24-8. Un additionneur complet peut également ne comporter que des portes NAND.

Votre petit additionneur personnel

Où en sommes-nous de nos expériences pratiques ? Habituellement, je suggère d'assembler d'abord les composants, puis d'observer leur comportement afin de comprendre la fonction qu'ils réalisent et comment ils y parviennent. C'est le fondement de ce que j'appelle « apprendre en découvrant ».

Pour ce cas, j'ai pensé que si je n'expliquais pas la théorie en premier, le reste n'aurait pas de sens. Toutefois, vous pouvez vous lancer immédiatement dans la réalisation d'un calculateur qui vous permettra d'additionner deux nombres binaires à trois positions et de générer le résultat sur quatre digits.

Ce circuit utilisera un demi-additionneur et deux additionneurs complets. Un total de cinq portes XOR, cinq portes AND et deux portes OR seront nécessaires. Il y a quatre portes à deux entrées dans un circuit intégré quadruple portes à deux entrées. Il restera donc quelques portes inutilisées. En réalité, nous aurions assez de portes pour réaliser un circuit capable d'additionner deux valeurs binaires à quatre positions et générer un nombre à cinq digits. Je ne veux pas le faire, car une valeur binaire à cinq digits serait trop importante pour la prochaine expérience que j'ai en tête. Peut-être vous rappelez-vous ce que j'ai promis de vous montrer dans la prochaine expérience – et ce sera plus facile si nous le réalisons avec un nombre binaire à quatre digits.

Câblage de l'additionneur

Sur la fig. 24-9 page suivante, j'ai réuni un demi-additionneur et deux additionneurs afin de tracer le schéma complet d'un additionneur à trois digits, générant un nombre de 4 digits.

Les deux valeurs binaires à additionner sont entrées à l'aide d'interrupteurs représentés en haut du schéma. J'ai coloré en bleu foncé, la zone où sont situés ces interrupteurs, permettant l'entrée des nombres à additionner. Le poids binaire correspondant à chaque interrupteur est indiqué en vert.

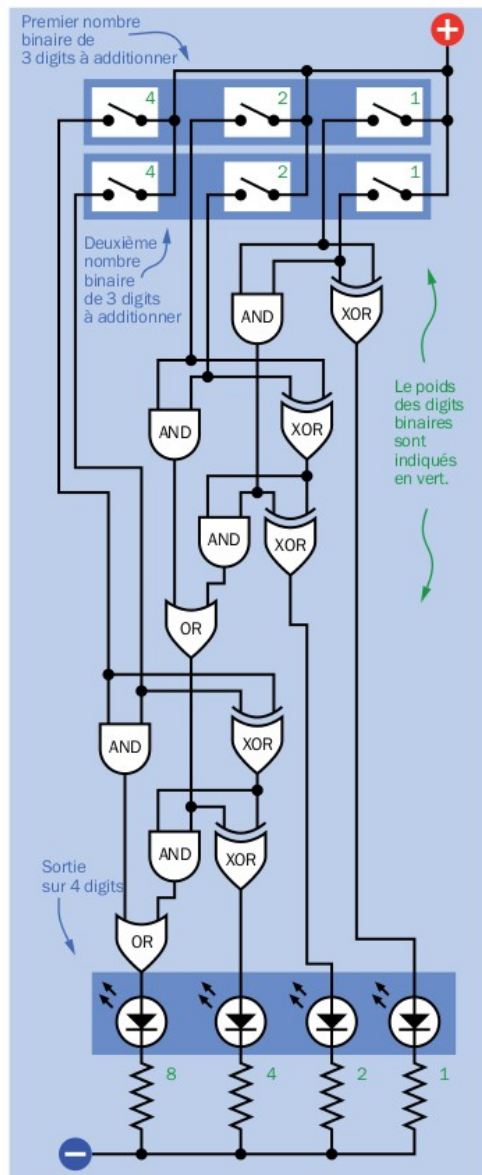


Figure 24-9. Diagramme logique montrant les portes pouvant additionner deux valeurs binaires de trois digits, générant un nombre résultant sur quatre positions.

Les portes ont été légèrement déplacées par rapport au diagramme précédent de l'additionneur complet. Les liaisons demeurent cependant identiques. Pour prendre un exemple au hasard, si votre opération est $5 + 7$ en valeurs décimales, vous devrez fermer les interrupteurs 4 et 1 de la rangée supérieure (pour faire 5), et les interrupteurs 4, 2 et 1 de la rangée inférieure (pour faire 7). Si votre additionneur fonctionne correctement, les LED 8 et 4 devraient s'allumer, indiquant le résultat décimal 12, les LED 1 et 2 restant éteintes.

Lors de la réalisation de ce circuit, vous devrez ajouter des résistances de rappel représentées sur la fig. 24-10, afin éviter que les entrées des portes logiques soient flottantes quand les interrupteurs sont ouverts.

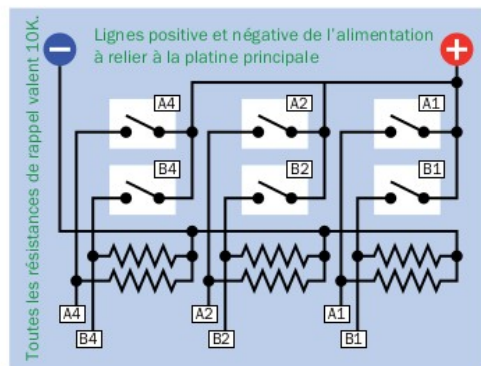


Figure 24-10. Interrupteurs d'entrée de l'additionneur à trois digits, munis de leurs résistances de rappel.

Les libellés des interrupteurs et de leurs sorties sont identiques à ceux de la partie principale du circuit illustré sur la fig. 24-11. Les petits cercles jaunes remplacent les symboles classiques des LED dans un but de clarification. N'oubliez pas d'ajouter des résistances en série entre la masse et vos LED, si vos n'utilisez pas de LED incorporant leurs propres résistances.

En raison de la présence de nombreuses liaisons en parallèle dans ce schéma, j'ai tenté de minimiser la confusion en repérant les deux pôles de l'alimentation en bleu et rouge.

La photo de la réalisation complète se trouve sur la fig. 24-12. Des interrupteurs DIP (dipswitch) ont été utilisés pour l'entrée des nombres car ils prennent moins de place sur la plaque de montage.

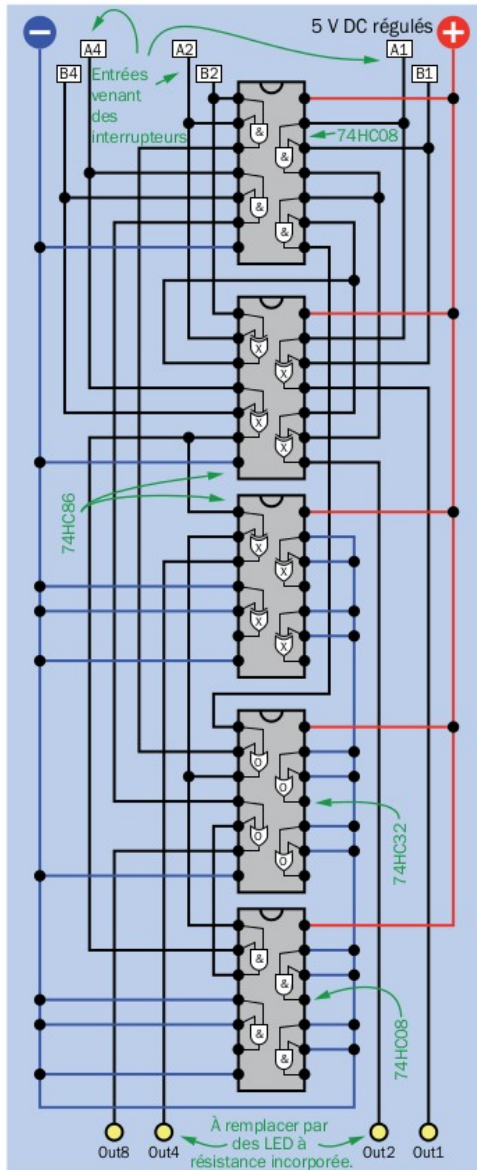


Figure 24-11. Plan de câblage des composants de l'additionneur à trois bits avec une sortie sur quatre bits. Les identifications en haut servent à la liaison avec les interrupteurs représentés séparément. Les numéros suivant les lettres indiquent le poids binaire de chaque position.

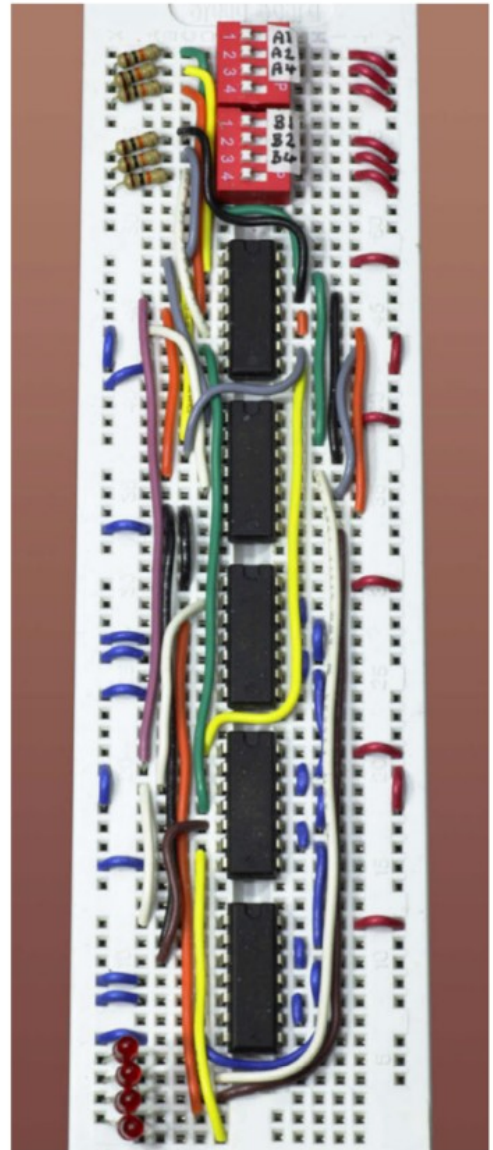


Figure 24-12. Vue du câblage de l'additionneur à 3 digits. Les interrupteurs représentent les poids 1, 2 et 4 des valeurs binaires à additionner. Les LED en bas de la figure indiquent les poids 1, 2 et 4 du résultat, de haut en bas.

Vous obtenez une petite calculatrice électronique qui aurait paru magique dans les années 1930. Le seul problème, à part ses capacités limitées, est la difficulté à l'utiliser. En effet, il vous faut convertir les nombres décimaux en binaire pour les entrer, puis convertir sa sortie binaire en décimale pour connaître le résultat. De plus, vous ne disposez même pas d'un pavé numérique, et encore moins d'un clavier.

Le premier ordinateur personnel, l'Altair 8800, commercialisé en kit en 1975, imposait l'entrée des données

par des interrupteurs à bascule. Cet appareil n'avait pas de clavier car il aurait été nécessaire d'ajouter de nombreux circuits pour l'interfacer avec le calculateur, et les circuits intégrés étaient alors très coûteux.

Je suis bien conscient que nous ne sommes plus en 1975, il est sans doute possible de simplifier l'entrée des données et d'améliorer la visualisation du résultat de notre additionneur. C'est l'objet de l'expérience suivante.

Ajouter une visualisation décimale du résultat de votre additionneur est plus simple que d'y adjoindre une entrée décimale, je vais donc commencer par là.

Le retour du décodeur

Il serait agréable d'avoir une paire d'afficheurs numériques sept-segments pour visualiser la sortie, mais ils requièrent des circuits utilisant le code binaire codé décimal (BCD) en entrée pour les piloter. En d'autres termes, les entrées de chaque circuit doivent être comprises entre 0001 et 1001 en binaire, soit 0 à 9 en décimal. Votre additionneur génère une sortie binaire comprise entre 0000 et 1110 et convertir ces valeurs de façon à piloter un afficheur sept-segments n'est pas chose facile.

Je pense que vous serez satisfait avec des diodes LED séparées qui représenteront une valeur décimale.

Pour y parvenir, utilisez un décodeur 4-bits à 16 sorties, déjà rencontré dans l'expérience 19. Mais il doit appartenir à la famille HC, soit le 74HC4514 et non plus l'ancien CMOS 4514, car chaque sortie doit être capable de piloter une LED. L'entrée binaire du circuit est fournie par les sorties de poids 1, 2, 4 et 8 de votre additionneur. Les sorties piloteront des LED auxquelles seront assignées les valeurs décimales 0 à 14 (gardez à l'esprit que l'addition la plus grande pouvant être effectuée par votre additionneur est $111 + 111 = 1110$ en binaire, soit 14 en valeur décimale).

Ces composants additionnels ne pourront pas être implantés sur la même platine de montage que l'additionneur à 3 bits, mais vous pouvez acheter des plaques de montage peu coûteuses, particulièrement si elles sont du type que je recommande avec une seule ligne d'alimentation de chaque côté de la longueur. Je suppose que vous utiliserez donc une paire de plaques de montage pour cette expérience.

Le schéma de la partie affichage est représenté sur la fig. 25-1.

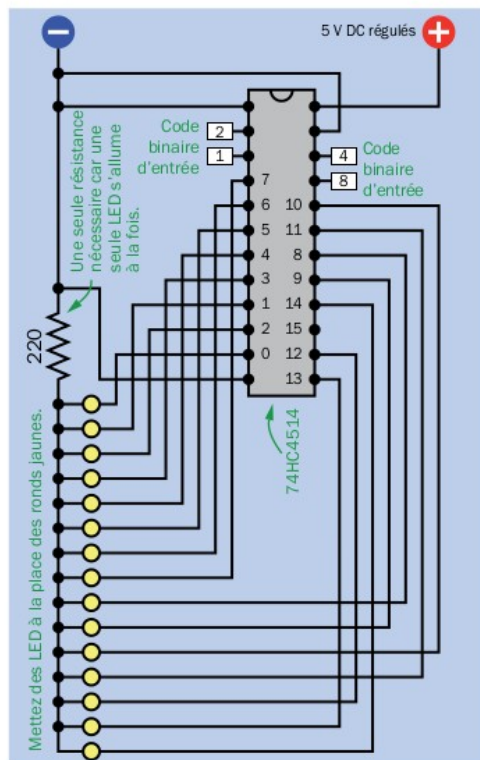


Figure 25-1. Sorties de l'additionneur de l'expérience 24 reliées aux entrées d'un circuit intégré décodeur 74HC4514. Chacune des sorties de 0 à 14 est connectée à une LED. Une seule sortie étant active à la fois, les LED peuvent se partager la même résistance série.

Vous aimeriez probablement que les LED soient bien ordonnées, mais les sorties du 74HC4514 ne le sont pas, comme vous pouvez le constater sur l'image.

Pour réaliser ce montage simplement, il est recommandé de placer les LED le plus en bas possible de la platine de montage, comme le suggère la figure où les ronds jaunes représentent les LED. Si vos diodes LED n'ont pas leur propre résistance interne, vous ne devez utiliser qu'une seule résistance pour l'ensemble, car une seule LED est allumée simultanément. Si le bus d'alimentation de votre plaque de montage est divisé en plusieurs sections, toutes les LED pourraient être reliées à la partie centrale, elle-même reliée à la section supérieure au travers de la résistance série.

Nous en avons terminé ! Passons maintenant à la partie difficile.

Entrée par dipswitchs

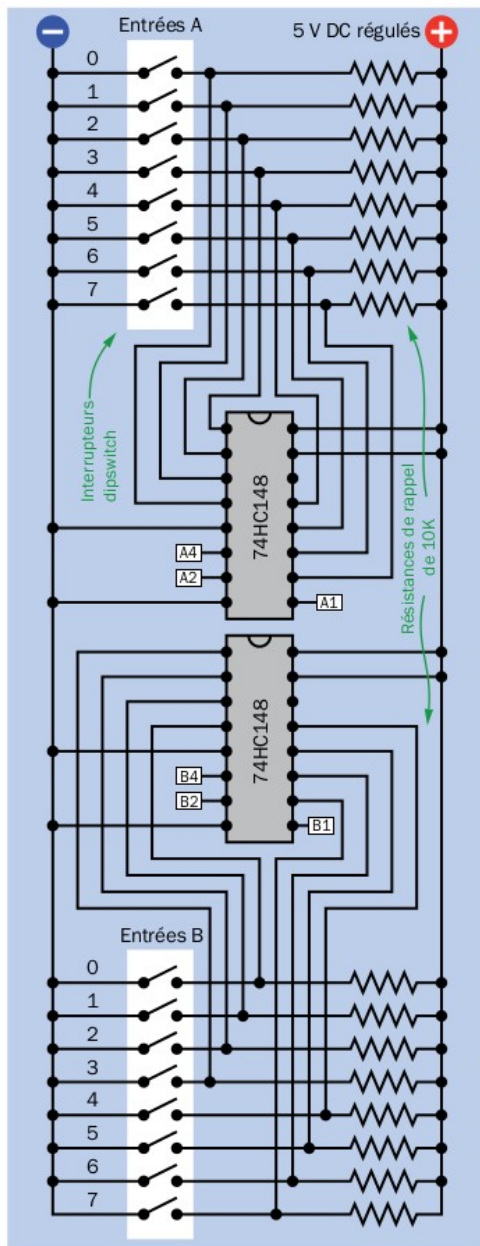
Pour les entrées décimales, vous pouvez utiliser de simples interrupteurs SPST. Il y aurait deux rangées de huit interrupteurs portant les valeurs 0 à 7. Pour entrer les deux valeurs à additionner, il suffit de basculer un interrupteur de chaque rangée.

Les interrupteurs de type dipswitch représentent la solution la plus simple, la plus économique et prenant le moins de place. Ils sont habituellement groupés par huit et numérotés de 1 à 8. Vous devrez les renuméroter de 0 à 7.

Les huit fils de chaque groupe d'interrupteurs dipswitch seront reliés aux entrées d'un circuit intégré encodeur à 8 entrées et 3 sorties. Comme vous vous en doutez, c'est l'opposé d'un décodeur, il reçoit le signal de l'une de ses huit broches d'entrée (de valeur 0 à 7) et le convertit en une valeur binaire à sa sortie (de poids 1, 2 et 4). La sortie d'un encodeur peut directement attaquer les entrées repérées A1, A2 et A4 de votre additionneur, la sortie d'un deuxième encodeur alimentant B1, B2 et B4 (voir fig. 24-11).

Le schéma de câblage des deux encodeurs se trouve sur la fig. 25-2. Si vous le respectez scrupuleusement, il devrait fonctionner. Mais cela nécessite quelques explications supplémentaires, surtout si vous remarquez que les interrupteurs sont reliés à la masse et non au pôle positif de l'alimentation. Pourquoi est-ce ainsi ?

Figure 25-2. Les sorties des deux groupes d'interrupteurs dipswitch sont reliées aux entrées d'un circuit intégré encodeur 74HC148. Notez que les entrées sont en logique négative et les résistances de rappel sont reliées au positif de l'alimentation. C'est à l'opposé de la plupart des circuits intégrés logiques.



Présentation d'un encodeur

Les encodeurs sont devenus rares, et ceux encore présents dans les catalogues des fournisseurs ont recours à la logique négative. En d'autres termes, un niveau d'entrée ou sortie bas représente un 1, le niveau haut un 0. C'est ennuyeux, car le circuit doit fonctionner avec votre additionneur qui utilise la logique positive traditionnelle. Sans détailler les raisons historiques qui ont conduit à la création de tels encodeurs, je peux tout de même utiliser le circuit intégré 74HC148 qui est le plus courant si je sais contourner ses fantaisies. Son brochage est indiqué sur la fig. 25-3.

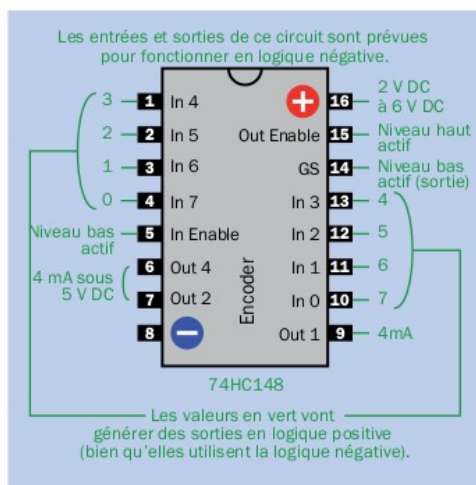


Figure 25-3. Brochage de l'encodeur 74HC148.

Il existe une astuce pour obtenir des sorties de l'encodeur actives au niveau haut. Pour cela, vous devez inverser la séquence des broches d'entrée. C'est indiqué par les chiffres en vert face aux entrées dans le dessin du brochage.

Êtes-vous perdu ? Permettez-moi de résumer. Pour obtenir du décodeur 74HC148 une sortie respectant notre logique positive préférée, il faut :

- attribuer la valeur 0 à l'entrée 7 ;
- attribuer la valeur 1 à l'entrée marquée 6 (et ainsi de suite pour les valeurs intermédiaires) ;
- attribuer la valeur 7 à l'entrée 0.

Chaque entrée sera toujours active pour un niveau bas. Il n'existe aucun moyen de contourner cela. L'astuce consistant à inverser l'ordre des entrées ne fait que rendre les sorties actives au niveau haut (ce que le reste du circuit comprendra). En revanche, comme mentionné sur la fig. 25-2, il faut relier chaque broche d'entrée à une résistance de rappel allant vers le pôle positif de l'alimentation, afin de maintenir un niveau haut par défaut (représentant la valeur 0). Les interrupteurs dipswitch sont reliés à la masse de façon à ce qu'un interrupteur activé, force un niveau actif bas (représentant un 1), à l'entrée du circuit intégré.

Autres fonctions d'un encodeur

Juste pour corser un peu plus le sujet, le 74HC148 a quelques autres fonctions surprenantes. Il possède une broche « sélection de groupe » (*Group Select*) identifiée par GS sur la plupart des fiches techniques. Il s'agit d'une sortie active au niveau bas, lorsque le circuit traite une valeur d'entrée. S'agissant d'une sortie, vous n'avez pas à vous en soucier et vous pouvez la laisser non connectée. En ce qui concerne les deux broches d'activation (*Enable*), l'activation des entrées (*Input Enable*) est en logique négative, je l'ai donc reliée à la masse. La broche d'activation des sorties est active pour un niveau haut (pourquoi, je ne saurais le dire), je l'ai donc reliée au pôle positif de l'alimentation.

À ce stade, vous pourriez vous demander s'il existe encore des applications pratiques nécessitant un circuit intégré encodeur. En fait, ils peuvent être utilisés dans des applications industrielles de contrôle de processus dans lesquelles, par exemple, un objet passe devant une série de capteurs qui sont soit « actifs », soit « inactifs ». Si vous utilisez un microcontrôleur possédant un nombre limité d'entrées, vous pourriez relier les capteurs au travers d'un encodeur à 8 entrées et 3 sorties pour réduire les points d'entrée à trois. Les possibilités de cette technique sont encore renforcées si l'on a un grand nombre d'entrées car il est possible de relier les encodeurs en chaîne, et à chaque fois que le nombre d'entrées double, le nombre de lignes de sortie n'augmente que d'une unité. Ceci est dû au fait que chaque poids binaire d'un digit double par rapport au poids de la position précédente. Comme il est difficile d'évaluer le poids d'une position binaire, je vais y revenir un instant.

Fondamentaux : la puissance du système binaire

Jusqu'à présent dans ce livre, nous avons travaillé avec des entrées ou sorties binaires de poids 1, 2, 4 et 8. Le doublement du poids de chaque digit par rapport au précédent pourrait ne pas paraître particulièrement significatif, car notre système de numération à base 10 est beaucoup plus puissant, chaque position étant multipliée par 10 par rapport à la précédente. Néanmoins, le fait de doubler peut entraîner des conséquences inattendues.

Dans un nombre binaire de 8 bits, le digit le plus à gauche a pour poids 128, l'ensemble des digits peut représenter un nombre compris entre 0 et 255. Ces valeurs sont très fréquentes en informatique. L'octet d'un ordinateur est constitué de 8 bits. Une image JPEG est composée de trois couleurs (rouge, vert, bleu), chacune étant représentée par une valeur s'échelonnant entre 0, signifiant « noir complet » et 255 « brillance maximale ». On pourrait penser qu'une variation de 255 niveaux de couleur n'est pas très importante, mais comme chaque couleur peut varier indépendamment des autres, le nombre total de combinaisons est :

$$256 * 256 * 256 = 16\,777\,216$$

Si vous avez entendu dire que la carte vidéo d'un ordinateur pouvait créer « 16 millions de couleurs », vous savez maintenant pourquoi.

Si l'on augmente le nombre de digits binaires, la situation devient plus intéressante.

Un nombre binaire de 16 bits peut représenter une valeur comprise entre 0 et 65 535.

Un nombre binaire de 32 bits peut prendre une valeur légèrement supérieure à 4 milliards. C'est pour cette raison qu'un ordinateur à 32 bits ne peut pas adresser une mémoire supérieure à 4 gigaoctets.

En ce qui concerne le terme « gigaoctet », le préfixe « giga » équivaut à 1 milliard, mais dans un ordinateur, « giga » est un nombre binaire constitué d'un 1 suivi de 30 zéros. Sa valeur décimale est de 1 073 741 824. Cette situation est apparue quand un kilo-octet a été défini par la valeur binaire 10 000 000 000 soit 1 024 en notation décimale. Ainsi, un méga-octet est devenu 1 024 kilo-octets, et un gigaoctet, 1 024 méga-octets. En revanche, dans le cas d'un disque dur, un gigaoctet vaut 1 milliard décimal. Juste au cas où vous poseriez la question.

Mais revenons à la puissance des nombres binaires.

J'ai une petite calculatrice valant à peine 10 € pouvant manipuler des nombres aussi grands que 999 999 999 999, soit presque 1 billion. Combien de digits binaires sont nécessaires à cette calculatrice pour traiter de telles valeurs ? Je pense que 41 bits sont suffisants, en considérant qu'un de ces bits est utilisé pour indiquer si un nombre est positif ou négatif.

Même si un code binaire est limité à des 0 et des 1, il est capable de traiter de très grands nombres.

Fondamentaux : réalisez votre encodage

Si vous préférez ne pas utiliser un circuit intégré 74HC4514, vous pouvez créer votre propre encodeur, sa logique étant assez simple. Suivez les liaisons sur la fig. 25-4, et vous constaterez que si vous activez (par exemple) l'interrupteur 6, les sorties binaires de poids 4 et 2 seront activées. Appelez-vous que si vous réalisez ce circuit, prévoyez des résistances de rappel vers la masse pour chaque interrupteur.

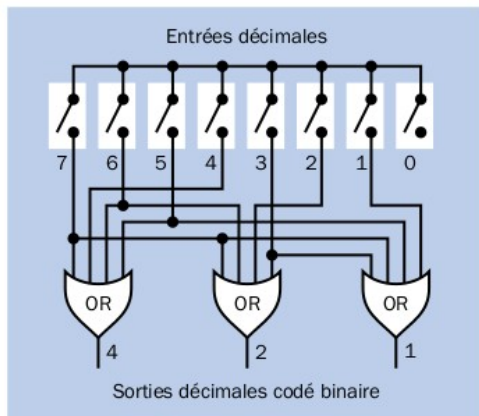


Figure 25-4. Trois portes OR à quatre entrées sont suffisantes pour créer un encodeur à 8 entrées et 3 sorties. Des résistances de rappel vers la masse (non représentées) devront être ajoutées à chaque interrupteur.

Vous vous rappelez peut-être que j'ai déjà voulu utiliser des portes OR à quatre entrées mais qu'elles n'existaient pas dans la famille HC (voir expérience 20). Cela sera-t-il un problème ici ? Non, dans ce circuit, les sorties des portes OR n'auront pas à piloter de LED. Elles seront

reliées aux entrées des autres circuits de l'additionneur de la fig. 24-11. Vous pouvez donc utiliser des circuits intégrés de l'ancienne série CMOS 4000. Deux circuits doubles portes OR à quatre entrées feront l'affaire. C'est parce que j'aime minimiser le nombre de circuits que j'avais utilisé un encodeur 74HC148 au lieu des deux circuits double portes OR à quatre entrées.

Pour aller plus loin : autres alternatives d'entrée

Pour l'entrée des données, au lieu d'utiliser des interrupteurs dipswitch, vous pourriez préférer des commutateurs rotatifs à huit positions. Certes, ils éviteraient le risque d'entrer plus d'un nombre à la fois, mais ils ne pourraient pas être installés sur votre plaque de montage et ils sont plus coûteux.

Vous pourriez également envisager d'utiliser un clavier numérique, en particulier si vous en trouvez un qui ne soit pas matricié. Un pavé numérique conçu avec un encodage matriciel est destiné à être relié à un microcontrôleur. Un clavier non matricié fournit une sortie pour chaque chiffre entré mais ce type de pavé numérique est plus rare. (J'en ai utilisé un dans une expérience du livre *L'Électronique en pratique*).

Enfin, vous pourriez utiliser un sélecteur rotatif à molette qui vous permet de choisir le nombre à entrer entre 0 et 9, ou entre 0 et 15. Ces sélecteurs sont parfois appelés injustement « encodeurs ».

Et des interrupteurs ?

Maintenant que j'ai converti les entrées et sorties de l'additionneur binaire en nombres décimaux, vous pensez peut-être que ce projet est arrivé à son terme. En réalité, j'ai une suggestion de plus à formuler. Vous vous rappelez sans doute que j'ai décrit des versions utilisant des interrupteurs, au lieu de circuits intégrés logiques, pour le testeur de télépathie, le jeu Pierre, feuille, ciseaux et le jeu d'Ovide. Évidemment, je ne pense tout de même pas à utiliser des interrupteurs électromécaniques pour réaliser un additionneur binaire ?

À vrai dire, je ne résiste pas à cette idée. Cependant, s'agissant d'une digression, je ne la développerai pas comme une expérience à part entière, je me permets seulement de l'évoquer ici, au moins pour le plaisir, en tout cas le mien. L'idée d'un additionneur qui ne

comporterait aucun circuit électronique (à part les LED) me plaît.

Bien que cette sorte de réalisation ne soit d'aucun intérêt pratique, elle vous aidera à réfléchir à la manière d'un ordinateur, ce qui est nécessaire pour concevoir efficacement des circuits (ou du logiciel). C'est pourquoi je pense que cela vaut la peine d'être vu.

Pour aller plus loin : additionneur binaire à interrupteurs

Je vous ai présenté l'équivalent des portes logiques sur la fig. 18-1. Puisqu'un demi-additionneur est constitué d'une porte XOR et d'une porte AND, vous pouvez le réaliser avec deux interrupteurs, comme sur la fig. 25-5.

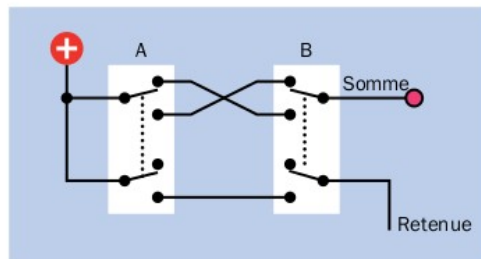


Figure 25-5. Le fonctionnement d'un demi-additionneur peut être mis en œuvre avec une paire d'interrupteurs DPDT. Une diode LED, avec sa résistance série habituelle, peut être utilisée pour visualiser la sortie « Somme ».

Si des interrupteurs se substituent aux portes logiques, une entrée consiste à activer un interrupteur. Ainsi, pour réaliser la somme $1 + 0$, il faut activer l'interrupteur de gauche et laisser l'autre inactif. Il en résulte la bonne réponse de 1 en allumant la LED, et sans retenue. Si vous entrez $1 + 1$ en appuyant sur les deux interrupteurs, vous obtenez la réponse exacte 10, représentée par une retenue alors que la LED est éteinte.

Cela paraît assez simple, mais un additionneur complet est plus problématique. Remémorez-vous la logique d'un additionneur en vous reportant à la fig. 24-5. La partie supérieure est identique à un demi-additionneur dont je viens de parler. Pas de problème. Mais la sortie de la première porte XOR est reliée à un second XOR, qui est ensuite traité avec la retenue provenant de la position binaire précédente.

Le problème vient du fait que nous devons utiliser des poussoirs en entrée, mais le second circuit XOR ne reçoit que des signaux électriques intermédiaires, rien qui ne puisse être le résultat de l'action d'un bouton-poussoir.

Il existe une autre difficulté. Une sortie basse peut être interprétée par une porte logique aussi facilement que si elle était haute. Mais quand des interrupteurs sont utilisés, un niveau de sortie bas correspond à un contact ouvert qui ne peut pas être interprété car il s'agit d'un état indéterminé.

Pour résoudre ces deux problèmes, une sortie « retenue absente » active et une sortie « retenue » active, générées par le demi-additionneur, sont nécessaires. Cela permet de fournir des tensions à l'étage additionneur suivant.

La fig. 25-6 représente le schéma modifié du demi-additionneur. La sortie « retenue absente » est active si aucun interrupteur n'est appuyé ou si l'un ou l'autre des interrupteurs sont activés mais pas les deux. Les deux sorties « retenue » et « retenue absente » sont ainsi toujours à l'opposé l'une de l'autre.

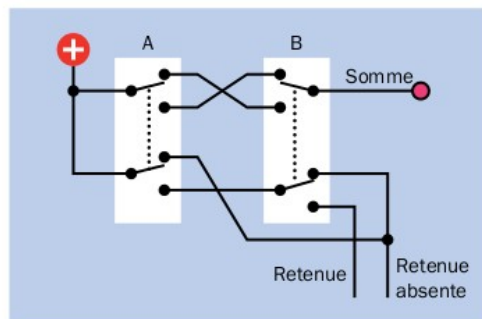


Figure 25-6. Version modifiée du schéma précédent, dans lequel a été ajoutée une sortie « retenue absente » permettant l'envoi d'une tension à l'étage suivant.

Remplissez un tableau

L'étape suivante consiste à définir exactement ce que l'on attend d'un additionneur complet. Pour cela, j'ai utilisé un tableau, que vous découvrez sur la fig. 25-7. Ce tableau comprend les états des trois sorties qu'un additionneur doit générer et l'ensemble des combinaisons des entrées générant chaque sortie.

Poussoir A	Poussoir B	Retenue précédente	Retenue absente précédente	Somme
non activé	non activé	1	0	Somme = 1
non activé	activé	0	1	
activé	non activé	0	1	
activé	activé	1	0	
non activé	activé	1	0	Sortie Retenue = 1
activé	non activé	1	0	
activé	activé	1	0	
activé	activé	0	1	
non activé	non activé	0	1	Sortie Retenue absente = 1
non activé	non activé	1	0	
non activé	activé	0	1	
activé	non activé	0	1	

Figure 25-7. Sorties d'un additionneur complet, en réponse à toutes les combinaisons possibles de ses entrées.

Par exemple, la deuxième ligne du tableau indique que si le poussoir A n'est pas activé (représentant une entrée 0), que le poussoir B est activé (représentant une entrée de 1), et qu'il n'y a pas de retenue en provenance de l'étage précédent, la somme vaut 1. La onzième ligne du tableau reprend la même combinaison d'entrée qui génère une tension « retenue absente » vers l'étage suivant. Ceci est conforme car si l'on a un seul interrupteur activé et pas de retenue provenant de l'étage précédent, il n'y a pas de retenue à propager vers l'étage suivant.

Description des interrupteurs

J'ai pu, (avec une certaine difficulté) représenter la configuration des interrupteurs nécessaires pour réaliser un additionneur complet. Vous la trouverez sur la fig. 25-8.

Comme vous pouvez le constater, il faut un interrupteur à six pôles et un autre à trois pôles. De tels interrupteurs poussoirs à verrouillage sont disponibles. Toutefois, je n'ai pas encore terminé : je voudrais ajouter une LED à chaque poussoir pour indiquer s'il est activé. C'est assez facile pour l'interrupteur B, car il n'a que trois jeux de contacts ce qui me permet d'en utiliser un supplémentaire pour alimenter la diode LED. En revanche, il est hors de question d'ajouter un autre contact au poussoir A qui possède déjà six pôles. Il existe bien des inter-

rupteurs à huit pôles mais ils sont rares et chers, à moins que vous ne puissiez les trouver en Chine.

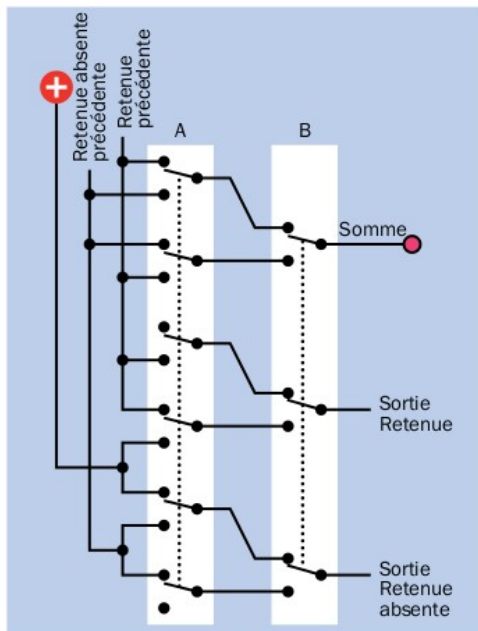


Figure 25-8. Additionneur complet, réalisé avec un interrupteur à six pôles et un interrupteur à trois pôles, générant les sorties spécifiées dans la table précédente.

Après avoir considéré ce problème pendant quelques temps, je me suis rappelé que Graham Rogers, un programmeur anglais qui partage ma passion pour les casse-têtes (il est à peu près aussi obsessionnel que moi), avait créé son propre additionneur avec des interrupteurs quelques années auparavant. Ne retrouvant plus son schéma, j'ai repris contact avec lui et découvert qu'il avait abouti au même circuit de base que moi. En revanche, il avait inversé les interrupteurs créant la somme, libérant un jeu de contacts de l'interrupteur de gauche pour alimenter une LED.

La fig. 25-9 présente le schéma modifié. Il n'est pas aussi simple que la version précédente mais il ne nécessite que des poussoirs à six pôles.

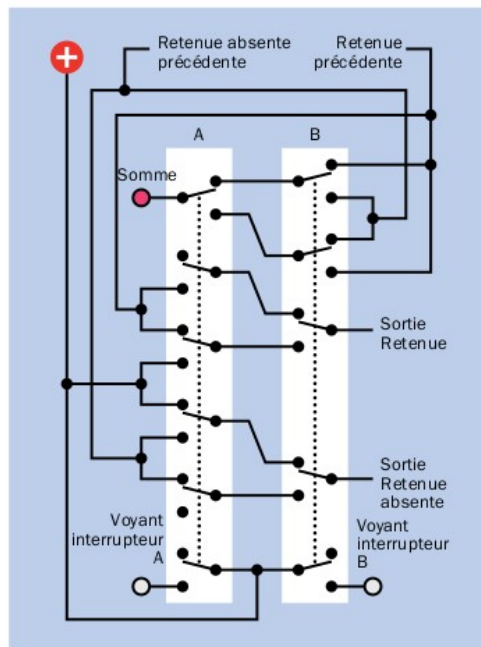


Figure 25-9. Schéma modifié de l'additionneur permettant l'utilisation d'un contact sur chaque poussoir pour allumer une LED.

Afin de traiter des valeurs binaires quelconques, vous pouvez relier autant de ces circuits en chaîne que vous le souhaitez. La version réalisée par Graham peut additionner deux nombres de 8 bits (2 octets), elle peut aussi réaliser des soustractions. Je ne me souviens plus des règles de la soustraction binaire, je vous laisse résoudre ce problème.

Pour aller plus loin : autres possibilités

Est-il possible de simplifier davantage cet additionneur à interrupteurs ? De réduire le nombre de contacts des interrupteurs ? À vrai dire, je ne pense pas, même si j'aimerais être contredit. Si vous avez une solution, faites-le-moi savoir.

Je ne peux pas résister à l'envie de savoir si l'on peut se débarrasser des portes OR de la fig. 25-4 et construire un encodeur uniquement composé d'interrupteurs, de façon à entrer un nombre décimal et le convertir

en binaire ? Cela me semble possible. Chaque fois que vous voyez une configuration de portes logiques aussi simple que celle de la fig. 25-4, vous pouvez être presque sûr qu'il est possible de la réaliser avec des interrupteurs.

C'est, en fait, assez facile. La fig. 25-10 montre le schéma retenu.

La sortie de ce circuit peut être utilisée en entrée de la version électronique de l'additionneur de la fig. 24-11, à condition que vous acceptiez de ne pas utiliser les interrupteurs dipswitch et de les remplacer par un ensemble d'interrupteurs SPST, DPDT et 3PDT.

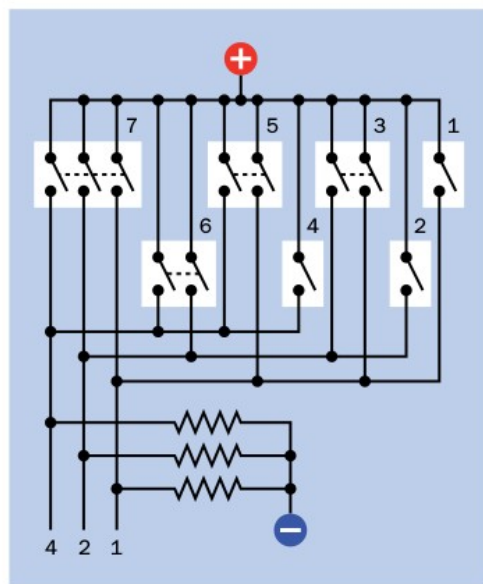


Figure 25-10. Le circuit ci-dessus montre comment remplacer l'encodeur à 8 entrées et 3 sorties par des interrupteurs.

En revanche, je ne vois pas comment interfacer ce circuit avec l'additionneur à interrupteurs. Le problème vient du fait que dans un additionneur à interrupteurs, les poussoirs d'entrée ne réalisent pas uniquement la saisie des nombres, ils ont également un rôle fonctionnel dans le traitement de l'opération arithmétique. Je serais très étonné de savoir s'il est possible de concevoir un additionneur à entrée décimale utilisant des interrupteurs ayant un nombre raisonnable de pôles. Mais je ne peux pas prouver que c'est impossible, l'inventivité humaine produisant parfois des résultats surprenants.

Souvenez-vous qu'avant l'ère des calculateurs électroniques modernes, les machines à additionner (réalisant parfois des multiplications) étaient entièrement mécaniques. En découvrant l'intérieur, vous pouviez observer un ensemble ahurissant de complexité d'engrenages et de leviers. Bien entendu, la création de ces appareils était élaborée avec un crayon et du papier, bien avant l'apparition de la conception assistée par ordinateur.

Revenant encore plus en arrière, la machine à différences (*Difference Engine*) de Charles Babbage (dont la première partie a été réalisée en 1832), était une machine à calculer qui a conduit Babbage à concevoir son « Calculateur analytique » (*Analytical Engine*), une machine à calculer mécanique universelle. La vision futuriste, combinée à la pugnacité, peut parfois permettre d'aboutir à des résultats remarquables, pour quelqu'un disposant du temps et de l'argent nécessaires pour traiter un problème.

Mais je dois maintenant continuer, en abordant les compteurs en anneaux et les registres à décalages. Cela va nous amener à l'exploration en profondeur du domaine du hasard, en utilisant plusieurs types de capteurs pour terminer les sujets abordés dans ce livre.

Faites tourner les anneaux

Un compteur en anneau est un compteur dont les sorties sont « décodées ». Ceci veut dire qu'il n'active qu'une sortie à la fois, en commençant par la broche représentant la valeur 0 et en allant jusqu'à la valeur limitée par le nombre de sorties. Au-delà, le cycle se répète automatiquement.

En comparaison, un compteur binaire possède des sorties « codées ». Autrement dit, les différents états, haut ou bas de ses sorties représentent un nombre binaire.

Le compteur en anneau que je vais utiliser ici est le 74HC4017 qui est aussi appelé compteur décimal, ce qui signifie qu'il peut compter jusqu'à 10 (de 0 à 9 en réalité). Je prévois de l'utiliser dans deux jeux différents qui testent les réflexes : l'un allumant des LED en séquence, l'autre les allumant de façon aléatoire.

Démonstration de l'anneau

Démontrer le fonctionnement d'un compteur en anneau est chose facile. Il suffit de relier une LED à chacune de ses dix sorties et de le commander par un temporisateur fonctionnant très lentement. En élaborant mon test, j'ai constaté que la version bipolaire du timer 555 génère un signal de sortie tellement parasite, que le compteur en anneau l'interprétait comme étant plusieurs impulsions au lieu d'une. J'aurais probablement pu résoudre le problème en ajoutant un condensateur de filtrage, j'ai cependant préféré utiliser un composant moins bruyant : le temporisateur 7555. Il a un brochage identique à celui de l'ancien 555 et possède les mêmes caractéristiques techniques, mais sa sortie est propre, et parfaitement compatible avec les circuits intégrés logiques.

Attention : incompatibilités entre temporisateurs

Prenez soin de ranger vos circuits temporisateurs 7 séparément de vos anciens 555. Ils ont le même aspect, semblent fonctionner de façons identiques, mais le courant de sortie de certaines versions du 7555 est plus limité. Vous pouvez l'utiliser pour piloter d'autres circuits ou une LED, mais ne l'utilisez pas pour commander un relais. De plus, alors que le 7555 présente l'avantage d'avoir un signal de sortie propre, il peut se révéler exigeant en ce qui concerne ses entrées. Si vous le reliez au travers d'un condensateur de liaison, la valeur du condensateur est très importante. Un pic de tension peut, en effet, écourter prématurément son cycle. Ce n'est mentionné nulle part dans les fiches techniques, mais j'ai pu le constater.

Brochage peu pratique

Le schéma de la démonstration est représenté sur la fig. 26-1 page suivante. Comme pour la précédente expérience, j'ai représenté les LED par des ronds jaunes, n'ayant pas assez de place pour utiliser leur symbole. Pensez à ajouter une résistance série si vos LED n'en sont pas munies. Vous n'aurez cependant besoin que d'une seule résistance, car une seule LED sera allumée à un instant donné.

Remarquez que la broche 8 du compteur n'est pas reliée à une LED car c'est la broche de masse du circuit intégré.

Si vous assemblez et mettez ce circuit sous tension, vous verrez les LED s'allumer les unes après les autres, le compteur réagissant aux impulsions du timer. Malheureusement, les sorties du 74HC4017 sont mélangées, leur séquence étant même plus désordonnée que

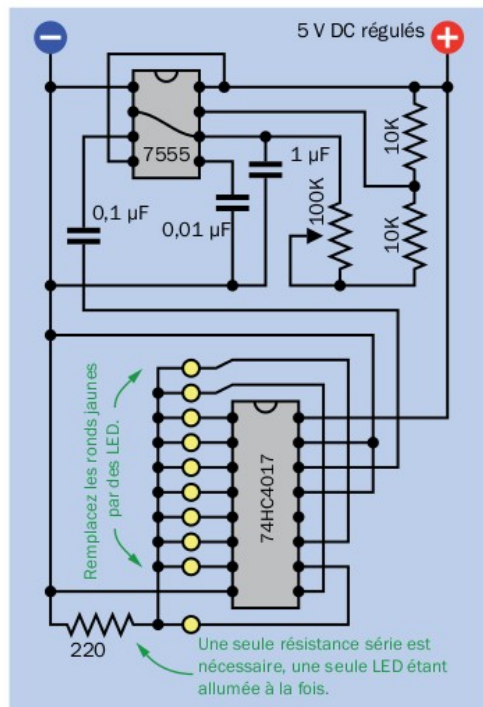


Figure 26-1. Circuit de démonstration du compteur décimal 74HC4017 commandé par des impulsions lentes injectées à son entrée d'horloge (clock), sa broche d'activation (enable) et celle de réinitialisation (reset), étant maintenues au niveau bas.

celle du décodeur 74HC4514 de l'expérience 25. La fig. 26-2 montre l'affectation des broches de ce circuit intégré.

Vous pourriez déplacer les LED plus bas sur la plaque de montage et réorganiser l'ordre des valeurs à l'aide de fils de pontage, comme suggéré lors de l'expérience 25. Mais attention, pour toutes les applications que j'ai à l'esprit, j'aurai besoin de toute la surface disponible de la platine de montage pour de nouveaux circuits intégrés. Une seconde plaque est nécessaire pour assembler les LED. Vous pourrez alors les relier au compteur par des fils de pontage, comme sur la fig. 26-3. Les liaisons sont représentées en couleur pour vous permettre de les suivre visuellement.

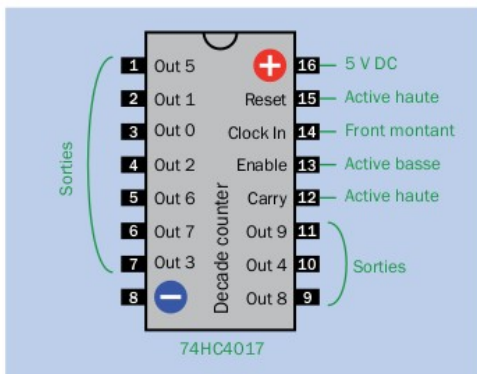


Figure 26-2. Brochage du compteur 74HC4017. Il s'agit d'un compteur en anneau dont les sorties sont décodées, car elles sont actives séparément, au lieu de représenter une valeur binaire. Ayant dix sorties, ce circuit est également appelé compteur décimal.

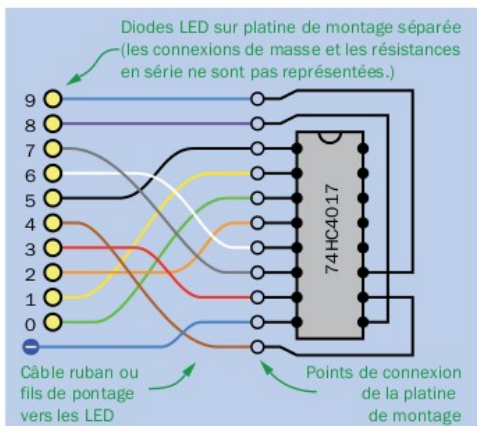


Figure 26-3. Réorganisation de la séquence des broches de sortie du compteur 74HC4017 pour piloter séparément, et dans l'ordre numérique des LED. Les liaisons colorées peuvent être réalisées avec des fils de pontage ou un câble ruban.

Vous pouvez choisir des fils de pontage flexibles comme dans le circuit de la fig. 26-4. Utilisez autant de couleurs que possible pour faciliter le repérage des connexions entre les deux platines.

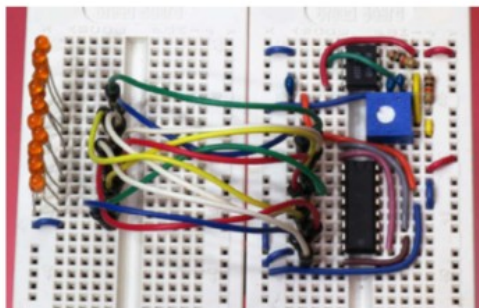


Figure 26-4. Des fils de pontage peuvent être utilisés pour réorganiser les sorties vers les LED qui devront s'allumer en ordre numérique. Les composants en haut de la plaque permettent de démontrer le fonctionnement du compteur décrit ici.

Par expérience, je sais que les petits embouts aux extrémités des fils de pontage ne réalisent pas toujours des connexions fiables. L'utilisation d'un câble ruban dont les extrémités sont soudées à des barrettes de connexion est une meilleure solution (voir fig. 26-5).

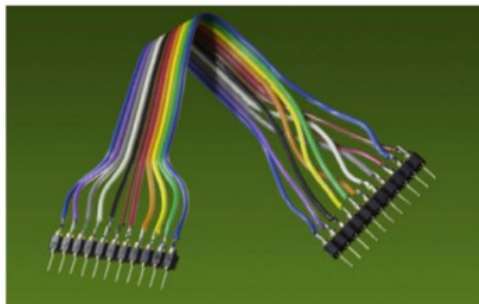


Figure 26-5. Câble ruban soudé à des barrettes de connexion, à chaque extrémité. Les conducteurs sont réordonnés de façon à réaliser les liaisons de la figure précédente.

Si vous n'avez jamais vu de barrettes de connexion, je fais une pause pour vous les décrire car leur usage peut parfois sembler confus.

En bref: les barrettes de connexion

Ces barrettes sont appelées *headers* en anglais, ce qui peut prêter à confusion. Il s'agit de broches insérées dans une barrette en plastique, dont l'autre extrémité dépasse du support, comme vous le montre la fig. 26-5. Le support en plastique peut être découpé

à la longueur correspondant au nombre de broches souhaité. Elles peuvent ainsi être insérées dans une plaque de montage (si vous utilisez des barrettes avec un espacement de 2,54 mm bien entendu). Vous pouvez y souder les conducteurs d'un câble ruban tout en les réorganisant.

Pour des montages permanents sur des plaques d'essai perforées, il faut souder des barrettes de connexion. Les barrettes tulipe (semblables à des supports de circuits intégrés) et les barrettes de connexion figurent souvent ensemble dans les catalogues des fournisseurs. Une barrette de connexion et deux barrettes tulipe sont photographiées sur la fig. 26-6.

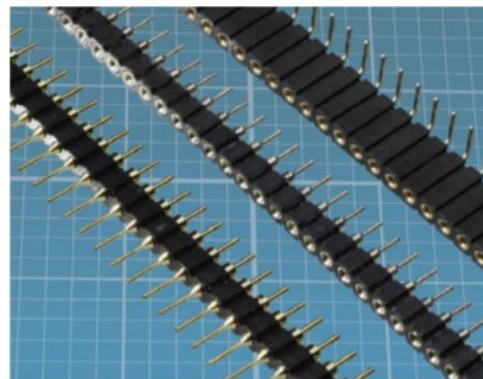


Figure 26-6. Barrettes de connexion et barrettes tulipe vendues sous forme de longueurs sécables permettant de disposer du nombre de points de connexion souhaités. Les deux types sont fréquemment appelés simplement « barrettes de connexion ». Différents modèles sont disponibles, comme le type coudé, à droite de la figure.

En bref: les compteurs en anneau

Avant de poursuivre avec le circuit de test, je vais résumer les points les plus importants concernant les compteurs en anneau.

- Le circuit intégré 74HC4017 est un compteur décimal ayant dix sorties qui sont activées séquentiellement, une seule à la fois.
- Ce type de circuit est également appelé compteur en anneau.
- Les compteurs en anneau ont habituellement huit, dix ou seize sorties.

- Un compteur dont les sorties sont codées en binaire représentera un 0 par un niveau bas de toutes ses sorties. Un compteur en anneau possède une sortie de valeur 0 qui sera active lorsque le compteur est à 0.
- Un compteur en anneau répète sa séquence de sortie indéfiniment, tant que son entrée d'horloge (*clock*) reçoit des impulsions.
- Le 74HC4017 fonctionne quand son entrée de réinitialisation (*reset*) est maintenue au niveau bas. La broche retenue (*carry*) est une sortie qui peut rester non connectée. L'entrée horloge réagit au front montant du signal d'horloge.
- La sortie retenue étant activée quand le compteur passe de la valeur 9 à la valeur 0, elle peut être utilisée en entrée d'horloge d'un second compteur permettant ainsi de compter jusqu'à 99. Des compteurs additionnels peuvent être connectés de cette façon.
- Quand la broche de réinitialisation est au niveau haut, le compteur est réinitialisé à la valeur 0.
- Certains compteurs en anneau ne sont pas des compteurs décimaux, et réciproquement, certains compteurs décimaux ne sont pas des compteurs en anneau. Un compteur en anneau possède des sorties décodées activées une par une, leur nombre peut être inférieur ou supérieur à dix. Un compteur décimal compte toujours de 0 à 9, mais il peut comporter soit des sorties binaires, soit des sorties individuelles décodées. Les sorties binaires d'un compteur décimal sont nommées « binaire codé décimal » ou BCD dans les fiches techniques.

Réalisez un jeu

À Las Vegas, il existe un jeu dans lequel les LED s'allument en séquence sur un anneau gigantesque : vous devez appuyer sur un bouton au moment exact où la LED la plus proche de vous s'allume. Il vous est attribué un nombre limité d'essais avant de devoir payer à nouveau pour une nouvelle partie.

Un tel jeu est facilement réalisable. En revanche, il sera plus difficile de construire un cerce de LED sur une plaque de montage. J'ai choisi un compromis selon lequel les LED sont disposées en colonne, le joueur devant appuyer sur le poussoir lorsque la LED située en bas s'allume. Vous pourrez reconstruire le circuit en utilisant un anneau de LED si vous en avez le temps.

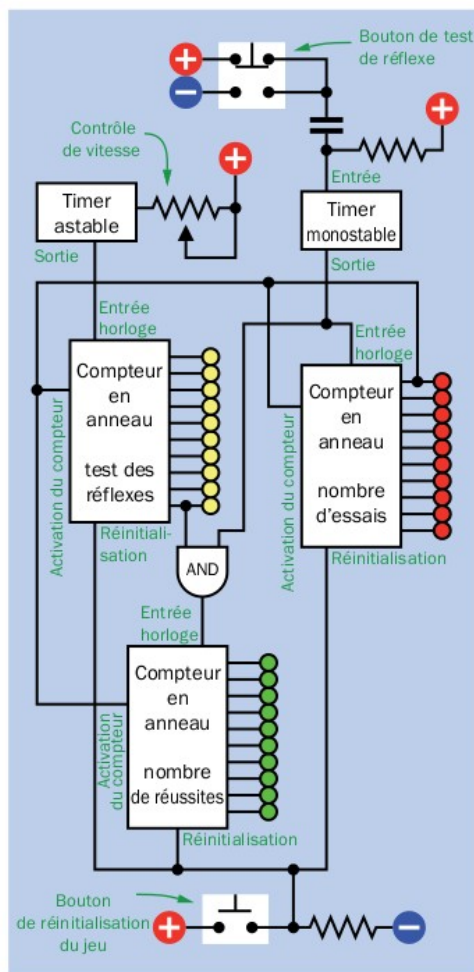


Figure 26-7. Ce diagramme fonctionnel décrit la logique du jeu de l'anneau.

Pour éviter que le joueur triche en maintenant constamment l'interrupteur appuyé, je peux ajouter un timer supplémentaire en mode monostable. Un temporisateur se resynchronise habituellement de lui-même lorsque son entrée de réinitialisation est maintenue au niveau bas. Mais si le bouton-poussoir est relié au timer à travers un condensateur de liaison, le condensateur ne transmettra que la transition initiale du niveau

haut vers le niveau bas (exactement comme le timer monostable de l'interrupteur chronophotonique de l'expérience 7). Par ailleurs, s'il a une valeur appropriée, il élimine également les petits parasites du signal, dus aux rebonds des contacts, lorsqu'on appuie sur l'interrupteur. (J'ai fourni quelques explications sur le rebond des contacts dans *L'Électronique en pratique*.)

Le poussoir présente deux pôles (il est de type DPST ou DPDT), de façon à relier le condensateur au pôle positif de l'alimentation quand le poussoir n'est pas activé. S'il n'en était pas ainsi, le condensateur n'aurait aucune charge à transmettre quand le poussoir est activé.

Le principe du jeu est illustré, sous forme d'un diagramme fonctionnel, sur la fig. 26-7.

Fonctions additionnelles

Dans le diagramme fonctionnel, on constate que lorsqu'un joueur gagne, une porte AND détecte que l'appui du bouton a été synchronisé avec le compteur en anneau. La porte AND active la gâchette d'un autre compteur en anneau qui comptabilise le score sur son groupe de LED vertes.

Pour terminer la partie, j'ai utilisé un troisième compteur en anneau utilisant dix LED rouges. Ce compteur s'incrémente à chaque fois que le bouton de test est appuyé, que le joueur réussisse ou non. Lorsqu'il atteint la valeur 9, la sortie 9 active les broches de réinitialisation des trois compteurs en rendant leur niveau haut. La seule possibilité pour rejouer est d'appuyer sur le bouton de réinitialisation du jeu situé en bas du diagramme. Cette action réinitialise les trois compteurs à la valeur 0 par application d'un niveau haut à leurs broches de réinitialisation. Le signal de réinitialisation a priorité sur les entrées d'activation des entrées d'horloge.

Comme vous pouvez le constater, vous aurez besoin de trente LED pour réaliser ce jeu. Heureusement, les diodes LED sont maintenant peu coûteuses (quelques centimes d'euro chacune en Chine). Compte tenu qu'une seule LED est allumée à la fois pour chaque compteur, chaque colonne de dix LED ne comporte qu'une seule résistance série. Il est donc inutile de dépenser plus d'argent pour acheter des LED avec résistances incorporées. Le schéma du jeu est exposé sur la fig. 26-8. En raison du manque de place, je n'ai pas représenté les LED sur ce schéma. Les cercles jaunes, rouges et verts reliés à chaque compteur doivent être remplacés par des LED de mêmes couleurs, disposées en ordre numérique.

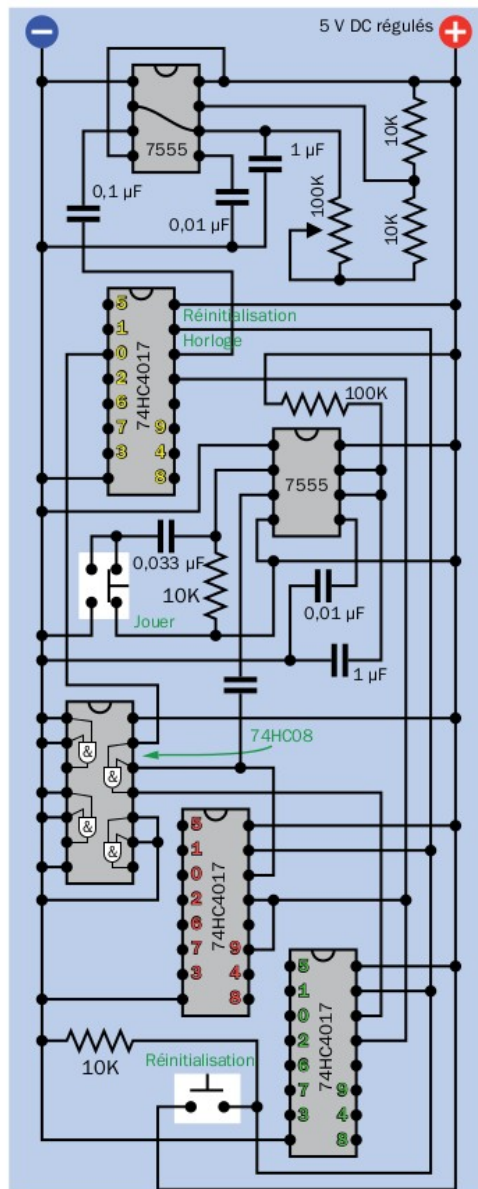


Figure 26-8. Schéma du jeu du compteur en anneau. Les chiffres en couleur indiquent que les broches doivent être reliées aux LED de même couleur disposées en ordre numérique.

Les couleurs correspondent à celles que j'ai utilisées sur la fig. 26-7.

Pour économiser de la place dans le schéma, j'ai décalé les circuits intégrés en diagonale. Vous devez bien entendu les aligner les uns au-dessus des autres, sur votre plaque de montage. Je pense que c'est possible.

Si vous réalisez le jeu en partant du circuit de test précédent, rappelez-vous qu'il faut déconnecter de la masse les broches 13 et 15 du premier compteur. Je les avais reliées à la masse afin de désactiver la broche de réinitialisation et maintenir le compteur actif en permanence. Dans le circuit du jeu, ces fonctions sont utilisées, respectivement pour débiter une nouvelle partie et mettre fin au jeu après dix essais. Les photos des deux plaques de montage du jeu sont présentées sur la fig. 26-9 et la fig. 26-10.

Réglage final du jeu

Régalez la vitesse du jeu à l'aide du potentiomètre ajustable. Lorsque vous y aurez joué quelquefois, remplacez le potentiomètre par un jeu de trois résistances sélectionnées à l'aide d'interrupteurs dipswitch pour disposer de trois niveaux de difficulté du jeu.

J'ai expérimenté le jeu avec trois boutons-poussoir différents et j'ai déterminé qu'il fonctionnait parfaitement avec un condensateur de 0,033 μF à l'entrée du timer monostable. Rappelez-vous, j'ai précisé que le 7555 était parfois exigeant à ce sujet. Si vous constatez que le timer est incontrôlable ou qu'il abrège la longueur de ses impulsions de sortie, essayez avec un condensateur de valeur plus élevée ou moins élevée, ou avec des boutons-poussoir différents.

La durée des impulsions du timer monostable est critique. Si l'impulsion est trop longue, le joueur pourra gagner en appuyant sur son bouton un peu avant que la LED du bas de la colonne ne s'allume, car la durée de l'impulsion recouvrira la durée d'activation de la LED. La résistance de 100K et le condensateur de 1 μF permettent de générer une impulsion d'environ 1/10 de seconde. Pour rendre le jeu plus difficile, remplacez la résistance de 100K par une de 47K ou de 22K, qui généreront respectivement une impulsion d'environ 1/20 ou 1/40 de seconde.

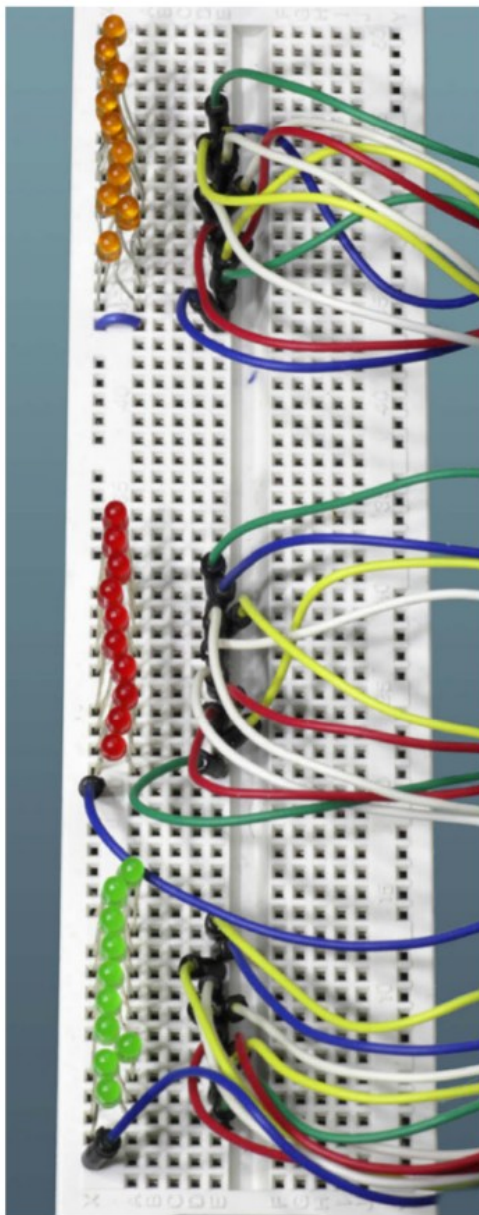


Figure 26-9. Partie gauche du jeu du compteur en anneau.

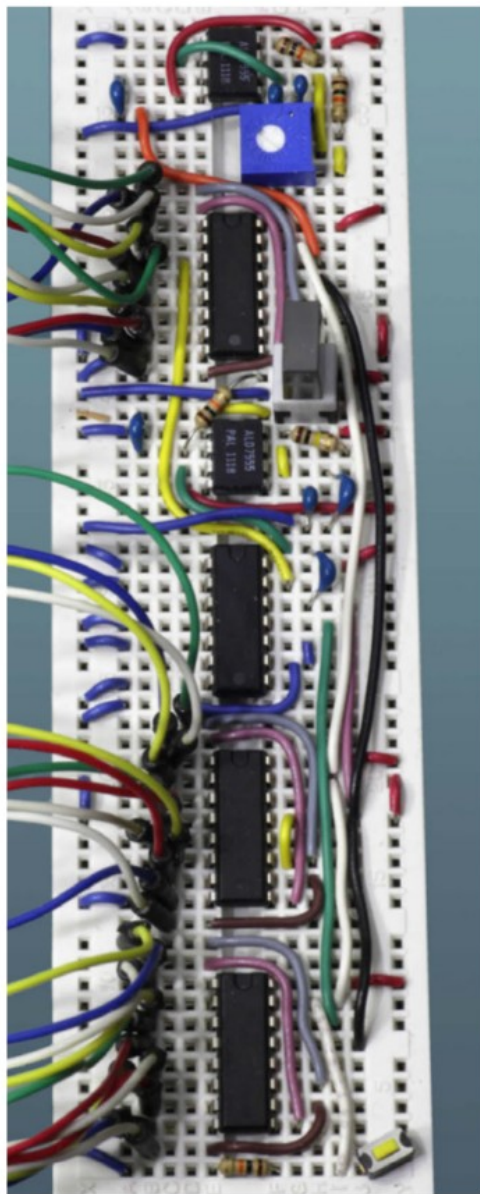


Figure 26-10. Partie droite du jeu du compteur en anneau reliée à la partie gauche par des fils de pontage.

Pour aller plus loin

Je pense que le jeu serait plus intéressant si la durée d'allumage des LED variait de façon aléatoire. Cela semble a priori compliqué, mais ça ne l'est pas. Dans l'expérience 22, nous avons vu comment relier les sorties d'un couple de temporisateurs au travers d'une porte XOR pour modifier la phase de leurs signaux dans le but de créer des effets audio imprévisibles.

Dans cette expérience, il suffit de ralentir la vitesse dans une proportion d'environ 1 000 et prendre la sortie de la porte XOR comme signal d'horloge du compteur en anneau du jeu de réflexes, au lieu d'utiliser le temporisateur en mode astable d'origine.

Vous n'aurez pas assez de place sur une seule plaque de montage pour réaliser ce générateur à cycle pseudo-aléatoire, mais vous pouvez utiliser une autre petite platine et la relier à la platine principale avec un fil de pontage (sans oublier les fils d'alimentation). Ajustez ensuite les deux potentiomètres ajustables jusqu'à ce que les LED s'allument et s'éteignent comme vous le souhaitez. Est-ce réellement aléatoire ? Non, mais cela paraît l'être, c'est tout ce que nous souhaitons. La séquence se reproduira plus ou moins tardivement, mais si vous ajustez la durée des timers pour qu'ils soient très légèrement déphasés, cela prendra un temps assez long.

La réalisation sur plaque de montage de ce circuit est illustrée sur la fig. 26-11 page suivante. Ce circuit est dérivé de celui de la fig. 22-1, à la différence près que les timers sont maintenant reliés à un compteur décimal au travers de la porte XOR.

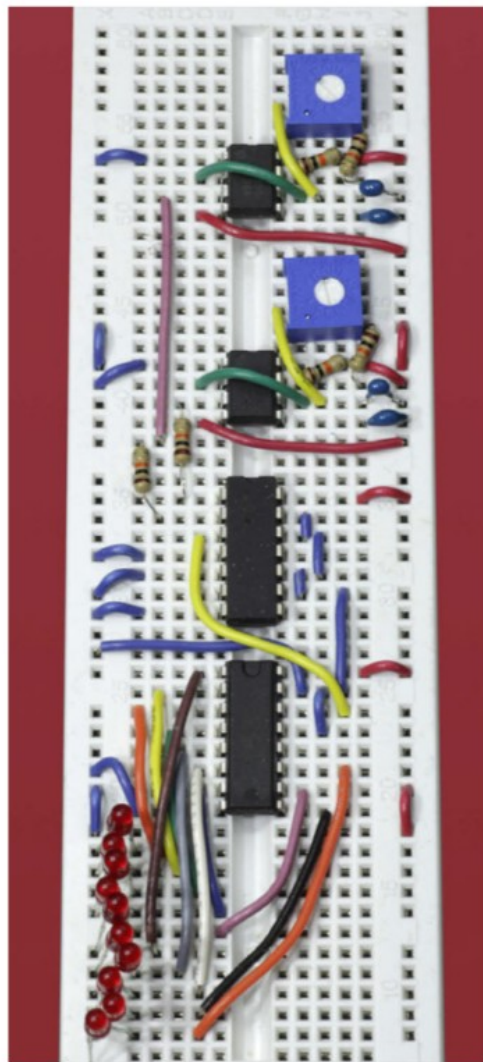


Figure 26-11. Précédemment développée dans l'expérience 22, l'idée d'utiliser une porte XOR pour mélanger les sorties de deux timers en léger déphasage est mise à profit ici pour créer une fluctuation semblant aléatoire du compteur contrôlant les dix LED.

Utiliser un microcontrôleur

Le principal défi pour reproduire ce jeu à l'aide d'un microcontrôleur serait de disposer de trente sorties pour piloter toutes les LED. Est-ce bien le cas ? En réalité, vous n'avez besoin que des dix LED jaunes pour rendre le jeu exploitable ; le score et le nombre de tentatives pourraient être visualisés sur un petit écran LCD. Et quand bien même les dix LED dépassent le nombre des sorties disponibles, vous pourriez les piloter par l'intermédiaire d'un circuit décodeur binaire-décimal, qui ne nécessite que quatre sorties binaires. Bien entendu, cela sous-entend que vous devez fournir des valeurs binaires au décodeur.

Contrôler l'activation du poussoir avec un microcontrôleur par l'utilisateur peut s'effectuer à l'aide d'une interruption. Mais il est souhaitable que le programme indique au microcontrôleur d'ignorer l'appui sur le bouton s'il intervient avant que la LED de valeur 0 ne soit allumée. Un appui prématuré signale une tricherie.

La plupart des microcontrôleurs utilisent un langage de haut niveau tel que le C ou le Basic qui intègrent un générateur de nombres pseudo-aléatoires. Cela élimine le besoin des deux timers et de leur porte XOR. Vous pouvez ajuster la vitesse du jeu à l'aide d'un potentiomètre ajustable relié à une entrée munie d'un convertisseur analogique-digital.

Alors oui, ce jeu peut être réalisé ainsi, et vous diminuez certainement le nombre de circuits intégrés. Mais bizarrement, je pense que la mise au point du jeu serait fastidieuse avec un microcontrôleur, car l'écriture et le débogage du programme ne seraient pas simples. La raison est que vous devrez intégrer toutes les fonctions des différents circuits intégrés dans un long programme. Il devra allumer les LED d'une façon aléatoire, puis, quand chaque LED est activée, vérifier l'état du poussoir de l'utilisateur et l'état du bouton de redémarrage du jeu, et enfin arrêter le jeu quand le nombre d'essais atteint le maximum permis. Il devra également mettre à jour le contenu de l'écran LCD et décoder l'entrée du potentiomètre de réglage de la vitesse du jeu dans une variable utilisée conjointement avec une horloge interne. Certaines de ces tâches peuvent être traitées à l'aide d'interruptions, mais il vous restera à écrire le code de prise en compte de ces interruptions lorsqu'elles se présentent.

Il s'avère parfois plus facile de câbler des circuits intégrés entre eux. En tout cas, j'apprécie d'avoir toutes ces LED colorées pour visualiser ce jeu.

207

Quand le poussoir est activé, il connecte le condensateur de liaison à la masse. Cet événement est transmis à l'entrée du timer, la forçant au niveau bas suffisamment longtemps pour déclencher le timer en mode monostable. La résistance de 100K et le condensateur de 0,033 μF déterminent la durée de l'impulsion de sortie, approximativement égale à un quart de seconde. Pendant ce temps, toute vibration des contacts du poussoir sera ignorée.

La durée de l'impulsion de sortie du timer doit être supérieure au temps des rebonds. En fait, les contacts cessent de rebondir après quelques millisecondes.

Quand le timer a terminé de générer son impulsion, il serait normalement réenclenché, si sa broche d'entrée restait au niveau bas. Néanmoins, dans ce circuit, même si le poussoir reste activé, le condensateur de liaison bloque la tension continue, et la résistance de rappel maintient l'entrée du temporisateur au niveau haut.

Si le bouton-poussoir reste appuyé alors que l'impulsion de sortie du timer se déroule, ce dernier ignore l'état du poussoir, termine son cycle et l'impulsion de sortie cesse.

Supposons maintenant que le poussoir soit relâché avant la fin du cycle du timer. Le condensateur de liaison est immédiatement rechargé et la résistance de rappel force l'entrée au niveau haut.

Si le poussoir est relâché avant la fin de l'impulsion générée par le temporisateur, celui-ci continue son cycle et l'impulsion de sortie retombe.

La seule erreur possible se produirait si le poussoir était relâché exactement quand l'impulsion de sortie cesse. Dans ces circonstances, si les contacts de l'interrupteur rebondissent, il est possible que le timer soit à nouveau déclenché.

Le timer devrait générer une impulsion courte (un quart de seconde ou moins) ou relativement longue (une seconde ou plus) afin d'éviter les conflits si les contacts rebondissent au moment précis où l'impulsion retombe.

Le timer apparaît sur le schéma avec une LED reliée à sa sortie pour la démonstration. Selon l'application, un autre condensateur de liaison peut être placé à la sortie du temporisateur afin de transmettre une brève impulsion à l'étage suivant, tout en bloquant la composante continue.

Démonstration du décalage des bits

Nous sommes maintenant prêts pour le registre à décalage. L'installation sur la fig. 27-2 ressemble un peu au circuit de test du compteur en anneau de la fig. 26-1, exception faite qu'il est contrôlé manuellement par le dispositif antibond que je viens de décrire. Remarquez qu'un 7555 est utilisé au lieu de l'ancien 555.

Vous trouverez une photo du montage de ce circuit sur la fig. 27-3.

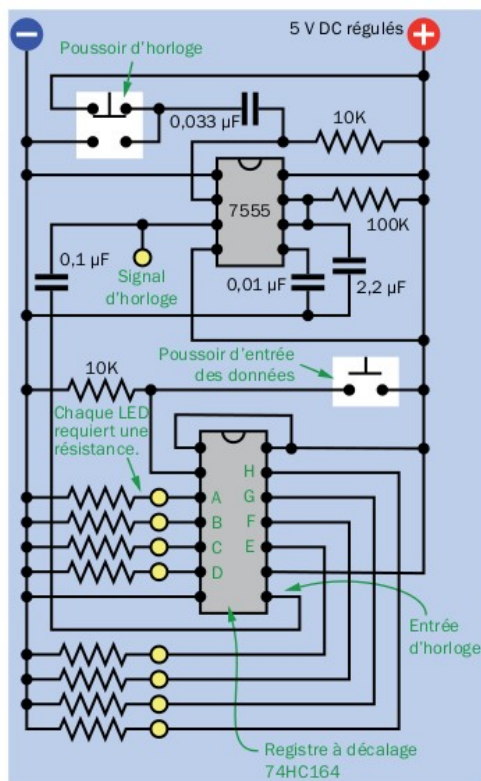


Figure 27-2. Circuit de démonstration montrant comment un registre à décalage déplace le contenu de sa mémoire sous le contrôle d'un signal d'horloge. Un bouton-poussoir permet de charger des données dans le registre à décalage.

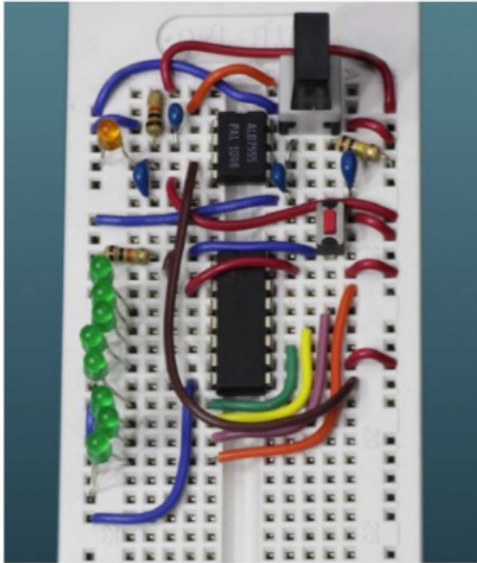


Figure 27-3. Vue du câblage du circuit de démonstration du registre à décalage.

Alors que les valeurs des broches du compteur en anneau utilisé précédemment (et du décodeur, encore avant), n'étaient pas en ordre numérique, les sortie du registre à décalage 74HC164 sont plus pratiques à utiliser car elles sont disposées en ordre séquentiel autour du boîtier, à partir de la broche 3, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Cela facilite la connexion d'une rangée de LED qui s'allumeront en séquence, bien que la séquence soit ordonnée du haut vers le bas.

Comme précédemment, les ronds jaunes sur la fig. 27-2 représentent des LED. Si vos diodes LED ne contiennent pas leur propre résistance, vous devez en ajouter une pour chaque LED du circuit. Alors que le décodeur et le compteur en anneau n'activaient qu'une seule LED à la fois, le registre à décalage peut allumer simultanément plusieurs LED, voire les huit à la fois.

J'ai ajouté une LED « signal d'horloge » uniquement pour vérifier, via sa sortie, que le temporisateur fonctionne correctement, car, lorsque vous mettez le circuit sous tension, les huit LED ne s'allument pas. Cela est dû au fait que les emplacements mémoire du registre

à décalage restent vides jusqu'à ce que vous ayez entré des données.

Maintenez le bouton d'entrée des données appuyé, et, dans le même temps, actionnez le poussoir d'horloge de façon répétitive. Le poussoir d'entrée des données applique un niveau haut à l'entrée du tampon du registre à décalage, et chaque fois que vous activez le bouton d'horloge, l'état du tampon d'entrée est copié dans le premier emplacement mémoire du registre à décalage (identifié « A » dans le schéma), le contenu des autres positions mémoire étant « poussées » pour libérer l'emplacement.

Maintenant, relâchez le poussoir de données, la résistance de rappel de 10K force alors un niveau bas à l'entrée du tampon. Si vous continuez à solliciter le bouton d'horloge, des niveaux bas sont « injectés » dans le registre à décalage, et le contenu de la mémoire est à nouveau décalé afin de libérer le premier emplacement. Qu'arrive-t-il au dernier emplacement identifié « H » dans le schéma ? Il est tout simplement perdu.

Un cycle unitaire du registre est visualisé sur la fig. 27-4. Chacun des huit emplacements mémoire peut être considéré comme contenant un digit binaire ou bit. Dans ce dessin, les bits des emplacements C et H sont hauts.

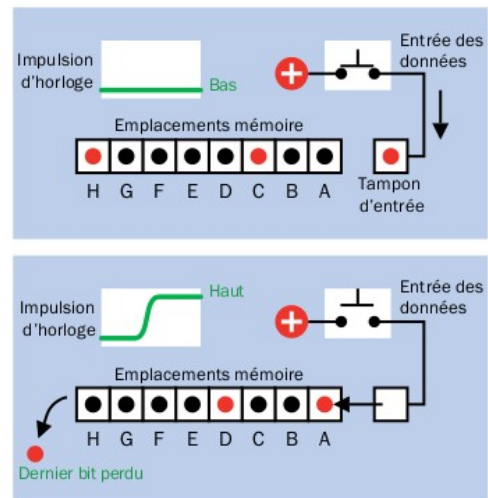


Figure 27-4. Déplacement des données en entrée, et à l'intérieur d'un registre à décalage.

Dans un premier temps, le bouton-poussoir injecte un état haut dans le tampon d'entrée. Puis le front montant de l'horloge décale l'ensemble du registre d'une position et copie le niveau haut du tampon à l'emplacement A.

Le bouton-poussoir d'entrée des données n'est pas relié à un circuit antirebonds, car le registre à décalage ne vérifie son état qu'au moment où l'horloge passe à l'état haut. Le reste du temps, le registre à décalage ignore cet interrupteur. Si vous l'activez brièvement entre deux impulsions d'horloge, le circuit ne réagira pas.

En bref: les registres à décalage

- Le registre à décalage contient des emplacements mémoire, chacun mémorisant un état haut ou un état bas. On peut les comparer à des digits binaires.
- La plupart des registres à décalage comportent huit bits. Il est toutefois possible de les relier en chaîne.
- Un signal sur l'entrée d'horloge indique au composant de perdre la valeur du dernier emplacement mémoire, de déplacer tous les autres bits d'un pas et de charger une nouvelle valeur au premier emplacement mémoire.
- La nouvelle valeur est déterminée par l'état, haut ou bas, de la broche d'entrée, au début d'un nouveau cycle d'horloge. La majorité des registres à décalage réagissent au front montant du signal d'horloge.
- Le registre à décalage ignore l'état de sa broche d'entrée jusqu'à ce qu'il soit déclenché par une transition du signal d'horloge.
- Certains registres à décalage peuvent convertir des données parallèles en série aussi bien que des données séries en parallèle.
- Il existe un registre à décalage dont la référence est TPIC6A595 qui a des sorties de puissance capables de délivrer une intensité de 100 mA ou plus. Cela peut être très utile pour certaines applications.

Brochage

Le brochage du 74HC164 est présenté sur la fig. 27-5. Huit broches sont reliées aux emplacements de la mémoire interne au circuit. Je les ai nommées A à H, certaines fiches techniques les identifient 1A à 1H, ou QA à QH, ou d'une façon similaire.

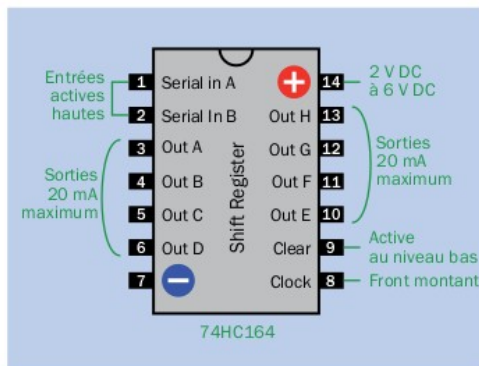


Figure 27-5. Brochage du registre à décalage 74HC164.

L'entrée Clear est active au niveau bas, elle met à zéro toutes les positions mémoire. Elle est donc normalement maintenue au niveau haut. Le circuit possède deux entrées de données en série sur les broches 1 et 2. Dans notre cas, l'une est maintenue haute et l'autre reçoit les données. Ces deux broches sont interchangeables.

Le circuit intégré 74HC164 est un composant relativement simple ne comportant que 14 broches. D'autres registres à décalage ont des fonctions supplémentaires. Je n'en parlerai pas ici.

Fondamentaux : les trains d'impulsions

Il y a très longtemps, la communication entre les ordinateurs et leurs périphériques s'opérait par un câble série qui comportait trois fils. L'un d'entre eux était la masse, un autre signalait à l'appareil externe de démarrer ou stopper le flot de données, et le troisième véhiculait les données.

Quand l'appareil récepteur accumulait 7 digits binaires, il les organisait sous forme d'un nombre binaire allant de 0000000 à 1111111 (0 à 127 en décimal), et chacune de ces valeurs était interprétée selon une codification représentant une lettre de l'alphabet en minuscule ou en majuscule. Il y avait également quelques codes de contrôle, comme « écrivez une nouvelle ligne de texte ». (Par la suite, ce code a été étendu à 8 bits mais la signification des codes additionnels n'était pas standardisée.)

C'est ainsi que, jadis, du texte était transmis. Ce système de codage très simple par caractères s'appelle ASCII, l'acronyme de *American Standard Code for Information Interchange*.

Ce système est lent et peu évolué, il est cependant toujours utilisé de nos jours pour la transmission de données en série, ce qui signifie que les bits sont transmis dans un seul fil, un par un. C'est le cas pour les liaisons avec les appareils USB ou les connexions SATA pour les disques durs internes. Les vitesses ont augmenté considérablement mais le principe de base demeure inchangé.

Les codes ASCII sont toujours les mêmes, et ils sont devenus un sous-ensemble de « l'Unicode » qui utilise jusqu'à 32 bits par caractère, facilitant la prise en compte des langues étrangères comme le japonais.

Dans mes explications, j'ai omis la partie délicate, concernant la façon dont l'appareil récepteur assemble le train d'impulsions reçu. Les premiers ordinateurs pouvaient traiter 8 bits (un octet) à la fois. Ils devaient donc recevoir les 8 bits en série, les mémorisaient dans 8 emplacements mémoire, puis les distribuaient sur huit liaisons parallèles afin de les traiter.

Comme vous l'avez sans doute deviné, le composant qui réalisait cela était un registre à décalage. C'était un registre qui pouvait décaler l'ensemble des bits. Il fonctionnait comme convertisseur série-parallèle.

Applications modernes

De nos jours, les fonctionnalités d'un registre à décalage sont incluses dans des composants plus importants réalisant de nombreuses autres fonctions. Les anciens circuits intégrés ont cependant toujours leur utilité.

Supposons, par exemple, que vous souhaitiez activer 8 dispositifs à l'aide d'un microcontrôleur qui ne dispose pas de 8 sorties disponibles. Vous transmettez les 8 bits en série sur une seule connexion reliée à un registre à décalage, à très haute vitesse, utilisant un second fil pour transmettre le signal d'horloge qui indiquera au registre à décalage à quel instant chaque bit arrive afin d'être entré dans sa mémoire. Les niveaux des 8 sorties du registre à décalage pourront alors contrôler les appareils externes. Le registre est mis à jour si rapidement que le résultat paraîtra immédiat.

En outre, il est possible de relier en chaîne plusieurs registres à décalage pour pouvoir contrôler 16, ou 24 ou même 32 dispositifs en utilisant un seul fil pour transmettre les données. C'est un concept très puissant.

Encore un point. Supposez que nous utilisions 7 bits d'un registre à décalage pour représenter un nombre binaire. Si nous décalons l'ensemble d'un pas vers la gauche et remplaçons le premier digit par un 0, nous multiplions le nombre par deux. Pourquoi est-ce ainsi ? Quand on déplace un nombre binaire d'un pas vers la gauche, le poids de chaque position vaut deux fois le poids de sa position précédente.

Hum... Pensez-vous que l'on puisse modifier l'additionneur binaire pour qu'il multiplie des sommes ? C'est une idée intrigante, mais je ne vais cependant pas m'y compromettre. Je vais utiliser un registre à décalage (en fait trois) dans un dispositif qui vous dira votre futur.

Dans cette expérience, vous allez réaliser une version électronique du *Yi Jing*, qui affichera une paire d'hexagrammes.

Si vous n'avez pas compris la phrase précédente, ne vous inquiétez pas ! Je vais vous expliquer de quoi il s'agit.

Une version plus courte de ce projet a été publiée dans le magazine *Make*. Comme il était vraiment trop complexe pour tenir en quelques pages, j'en présente ici une nouvelle version, avec davantage d'illustrations et des explications détaillées.

J'ai également simplifié le circuit avec l'aide de mon ami Fredrik Jansson, qui a construit son propre ordinateur uniquement composé de circuits logiques de la famille 4000. Mon premier contact avec Fredrik remonte à l'envoi d'un e-mail au magazine, à mon attention, m'indiquant que je pouvais éliminer une des portes OR du schéma de ce circuit. Je précise ce point pour que les faits soient clairs : je lis tous les messages qui me parviennent et je les considère avec beaucoup d'attention.

Les hexagrammes

Revenons au *Yi Jing*.

Le *Yi Jing*, orthographié aussi *Yi King*, est un livre chinois ancien, proposant des conseils énigmatiques concernant votre situation présente et des prédictions sur votre futur. Vous pouvez l'envisager comme étant à même de vous prédire votre destin. Cet étrange et remarquable recueil de conseils a plus de 2 000 ans, et ses origines remontent à plus de 3 000 ans. Certaines personnes pensent qu'il a un réel pouvoir de prédiction.

Je ne suis pas sûr qu'elles aient raison, mais d'un autre côté, il m'est difficile de prouver le contraire.

De nombreuses traductions du *Yi Jing* sont disponibles, certaines étant même proposées gratuitement en ligne. Chaque version contient 64 descriptions de base de votre état, identifiées par une image appelée hexagramme.

Pour vous donner un exemple, deux hexagrammes sont représentés sur la fig. 28-1, avec de brèves explications sur leurs significations. Toute personne prenant au sérieux le *Yi Jing* pourrait se plaindre de la trop grande simplicité de leur interprétation, ce qui est vrai. Je ne suis effectivement pas un expert en *Yi Jing*, je veux juste vous montrer comment le simuler électroniquement.

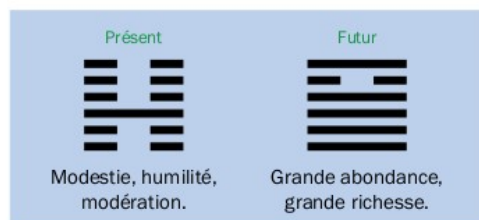


Figure 28-1. Deux exemples d'hexagrammes et leurs interprétations très approximatives.

Chacune des six lignes d'un hexagramme peut être continue ou interrompue. En d'autres termes, chaque ligne peut avoir deux états. On compte six lignes, c'est pourquoi le nombre total d'hexagrammes est de 64 :

$$2 * 2 * 2 * 2 * 2 * 2 = 64$$

Il est important de relever que l'hexagramme sur la gauche présente votre situation actuelle et que celui de droite décrit votre état à venir. Vous devez toujours

avoir un ensemble de deux hexagrammes pour savoir où vous en êtes et ce vers quoi vous tendez.

L'affichage

Quand j'ai commencé à réfléchir à ce projet, j'ai décidé de visualiser les hexagrammes électroniquement à l'aide de composants rectangulaires affichant des petites barres lumineuses par des LED. La fig. 28-2 expose une vue rapprochée d'un tel composant et la fig. 28-3 révèle une représentation possible du *Yi Jing* électronique.

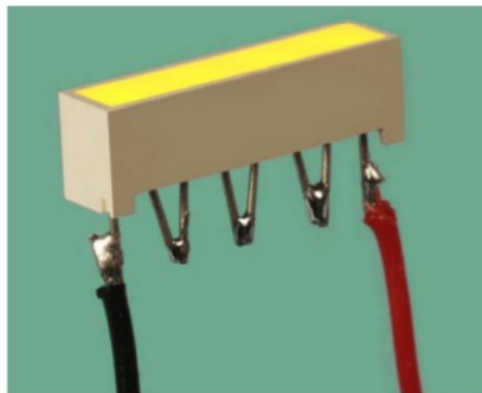


Figure 28-2. Un composant bargraphe LTL-2450Y (ou similaire), peut être utilisé pour réaliser un affichage de qualité.

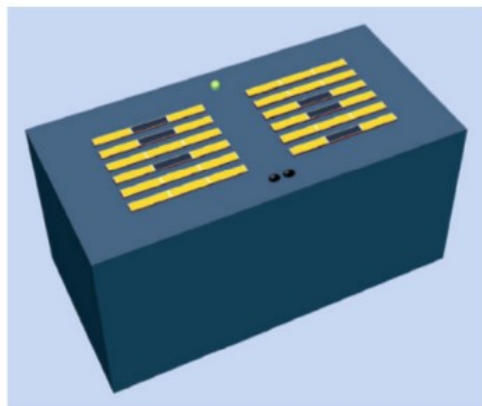


Figure 28-3. Rendu 3D du *Yi Jing* électronique affichant deux hexagrammes.

Pour utiliser le *Yi Jing* électronique, il faudrait appuyer sur un bouton pour générer l'affichage de deux hexagrammes. Vous pourriez alors rechercher leurs significations, dans une traduction du *Yi Jing* de votre choix, pour avoir une idée du sort qui vous est prédit.

Le défi sera de générer des hexagrammes conformément à la méthode traditionnelle.

La voie directe et les tiges

Dans les temps anciens, les lignes pleines et les lignes discontinues qui composent les hexagrammes étaient déterminées par un jeté de baguettes nommé l'achilléomancie, du nom d'une plante à petites fleurs blanches, l'achillée millefeuille. Les baguettes provenaient des tiges séchées de la plante. Le jeté des tiges devait suivre une procédure complexe consistant à les diviser en paquets, puis à les compter. Cependant, l'idée sous-jacente était claire : votre destin dépendait de la façon dont les tiges retombaient, au hasard.

Le jeté de ces baguettes nécessitait de respecter une technique complexe, et quand le *Yi Jing* connut un regain de popularité dans les années 1960, la plupart des gens n'avaient pas la patience de suivre les règles précises. En tout cas, peu d'entre eux connaissaient les tiges d'achillée millefeuille, et il était impossible de s'en procurer, car le Web n'existait pas encore. Cela paraît difficile à croire, mais dans les années 1960, on ne pouvait pas commander des objets sur Amazon ou eBay.

En conséquence, les gens ont commencé à utiliser un moyen plus simple pour générer les hexagrammes, en lançant des pièces de monnaie. Malheureusement, ce système créait un jeu d'hexagrammes différent de celui proposé par les tiges de plantes.

Quand j'ai commencé à élaborer une simulation électronique, j'ai décidé qu'elle serait aussi authentique que possible. Je voulais suivre fidèlement la technique originale basée sur le hasard du jeté des tiges d'achillée millefeuille – mais comment y parvenir ? Pas de problème, j'ai consulté Wikipédia qui propose une bonne introduction au *Yi Jing*.

Rappelez-vous, vous devez obtenir deux hexagrammes, celui de gauche décrivant votre présent, et celui de droite prévoyant votre destinée.

Le *Yi Jing* entre dans une multitude de détails concernant les situations où une ligne interrompue dans

l'hexagramme de gauche devient continue dans celui de droite ou vice versa. C'est ce qu'on appelle le « changement », raison pour laquelle le *Yi Jing* est souvent appelé le « livre des mutations ».

Pour y parvenir correctement, nous devons connaître les chances pour qu'une ligne discontinue devienne continue, et inversement, qu'une ligne continue le reste ou, enfin, qu'une ligne discontinue le reste également. Voilà comment les hexagrammes sont construits : une paire de lignes à la fois, six fois de suite. Pour plus de facilité, je ferai référence à une « rangée » pour désigner une paire de lignes horizontales, qui s'étend horizontalement sur les deux hexagrammes.

Les nombres

La fig. 28-4 montre les quatre possibilités pour que deux lignes continues ou discontinues constituent une rangée. Chacune de ces combinaisons n'a pas la même probabilité de se produire, du fait de la façon dont les tiges de millefeuille étaient comptées. Les probabilités sont indiquées sur la droite.

Ligne de gauche		Ligne de droite	Probabilité
—	et	—	3 sur 16
—	et	—	5 sur 16
—	et	—	1 sur 16
—	et	—	7 sur 16

Figure 28-4. Probabilités pour chaque combinaison des lignes d'hexagrammes, formant une rangée composée par une ligne de l'hexagramme de gauche et par une ligne de l'hexagramme de droite.

Comment réaliser cela électroniquement ? Déjà, le nombre 16 est intéressant, car (je suis sûr que vous vous en souvenez) un décodeur possède 16 sorties. Imaginez un temporisateur très rapide, contrôlant un compteur binaire dont la sortie est reliée à un décodeur. Supposez maintenant que le compteur s'arrête de façon arbitraire provoquant, au hasard, l'activation d'une des sorties du décodeur. Les sorties du décodeur pourraient être groupées de façon à créer des probabilités de 1 sur 16, 8 sur 16 ou toute valeur souhaitée.

La fig. 28-5 expose l'idée de principe. Le décodeur possède 16 sorties, numérotées de 0 à 15. Vous pouvez décider que si l'une des sorties du bas est au niveau haut, la ligne de gauche d'une rangée est continue, ce qui signifie que les bargraphes seront tous illuminés.

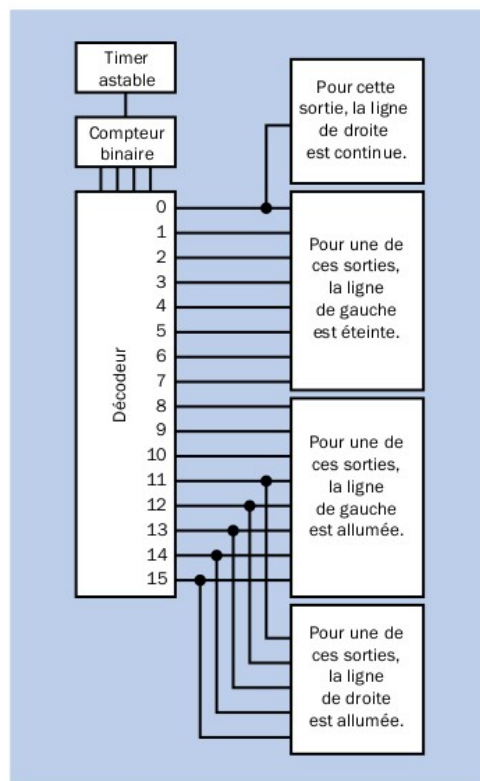


Figure 28-5. Organisation des sorties du décodeur, en groupes, permettant, en respectant les probabilités, de générer une paire de lignes d'un couple d'hexagrammes.

En observant la fig. 28-4, vous constatez que 8 fois sur 16, quand la ligne gauche est continue, 3 fois sur ces 8, la ligne de droite sera discontinue et 5 fois sur ces 8, cette même ligne sera continue. J'ai tenu compte de cela sur la fig. 28-5.

Maintenant, si l'une des huit autres sorties du décodeur est au niveau haut, la ligne de gauche sera discontinue, ce qui signifie que les deux barres lumineuses des extrémités seront allumées alors que celle du milieu restera

éteinte. Une fois sur ces huit, vous aurez une ligne de droite continue. Ceci est à nouveau conforme aux indications de la fig. 28-4.

L'état naturel des bargraphes est éteint, vous n'aurez donc qu'à vous soucier de leur allumage. Pour cela, les règles peuvent s'énoncer ainsi, en utilisant les numéros des sorties du décodeur.

- Règle 1 : si la sortie 8 OU (OR) la 9 OU (OR) la 10 OU (OR) la 11 OU (OR) la 12 OU (OR) la 13 OU (OR) la 14 OU (OR) la 15 est au niveau haut, la ligne gauche d'une rangée est continue.
- Règle 2 : si la sortie 1 OU (OR) la 11 OU (OR) la 12 OU (OR) la 13 OU (OR) la 14 OU (OR) la 15 est au niveau haut, la ligne droite d'une rangée est continue.

Il me semble que vous aurez besoin d'une paire de portes OR ayant beaucoup d'entrées. Mais attendez. Dans la règle 1 (comme Fredrik Jansson me l'a fait remarquer), la ligne gauche est continue pour toutes les valeurs de 8 à 15 (1000 à 1111 en binaire) et discontinue le reste du temps (0000 à 0111 en binaire). Qu'ont en commun les nombres binaires 1000 à 1111 ? Ils ont tous la valeur 1 dans l'emplACEMENT le plus à gauche. Je peux donc réécrire la règle de la façon suivante.

- Règle 1 (revue) : Si la sortie de valeur 8 du décodeur est au niveau haut, la ligne gauche d'une rangée est continue.

Parfait, nous n'avons plus besoin de porte OR pour la règle 1. En revanche, pour la règle 2 une porte OR à six entrées est nécessaire. En existe-t-il ? Non, mais il existe une porte OR à huit entrées (qui possède également une sortie NOR que nous pourrions ignorer). Je vais donc relier deux de ses entrées à la masse, et utiliser les six autres.

Tout cela est donc suffisant pour créer une rangée de lignes d'un couple d'hexagrammes. Il y a six rangées, il faut donc exécuter la procédure six fois.

Échantillons aléatoires

Ma méthode pour choisir un nombre au hasard consiste à échantillonner ou stopper le compteur rapide à un moment arbitraire. Bien, mais comment ?

Cela doit sembler automatique. Je ne veux pas que l'utilisateur soit obligé d'appuyer six fois sur un bouton. Pour cela, j'ajoute un timer très lent (environ une impulsion par seconde) en mode désynchronisé. Si sa vitesse

varie de façon imprévisible, je peux l'utiliser pour échantillonner le compteur rapide six fois.

Comment le rendre imprévisible ? J'ai une idée. Si vous humectez votre doigt, la résistance de la peau entre deux points suffisamment proches varie de 500K à 2M environ. Je peux utiliser cette résistance pour contrôler la rapidité des impulsions du timer le plus lent.

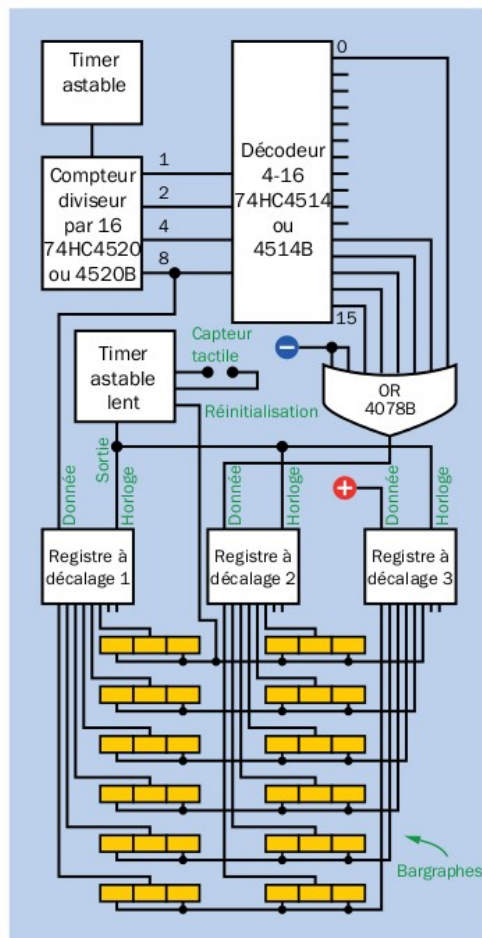


Figure 28-6. Circuits logiques générant les deux hexagrammes.

Tout ce qu'il me faut, c'est un système automatique qui génère la rangée du bas des deux hexagrammes,

se décale d'une rangée vers le haut, puis génère une autre rangée, se décale à nouveau et répète ainsi l'opération jusqu'à la sixième rangée. Le texte « décaler d'une rangée vers le haut » me suggère d'utiliser un registre à décalage.

En fait, j'ai besoin de deux registres à décalage, l'un pour mémoriser et visualiser les lignes de l'hexagramme de gauche, l'autre pour celles de l'hexagramme de droite. Je les appelle registre 1 et registre 2. Ils sont représentés sur la fig. 28-6 ci-contre, qui montre également un troisième registre à décalage que j'évoquerai d'ici peu.

Le compteur fonctionne en permanence, tout comme le décodeur, et ils sont reliés aux entrées de données des registres à décalage. (Par chance, les circuits intégrés ne s'usent pas quand ils fonctionnent en permanence à une telle vitesse). Mais, comme vous l'avez vu dans l'expérience 27, les registres à décalage ne réagissent pas tant qu'ils ne reçoivent pas un signal d'horloge. L'horloge leur indique de décaler le contenu de leur mémoire, d'entrer la nouvelle donnée et de fournir le résultat de sortie.

Le temporisateur fonctionnant lentement va générer les impulsions d'horloge. Peu importe qu'elles soient relativement longues car le registre à décalage ne répond qu'au front montant de chaque impulsion.

Comportement du montage

Voici le scénario. Mettez le *Yi Jing* électronique en marche. Humidifiez votre doigt et placez-le sur les contacts. Selon l'humidité de votre peau et la force avec laquelle vous appuyez votre doigt, le timer lent fonctionne à une vitesse variable. Il échantillonne le timer rapide à des intervalles aléatoires, et les deux hexagrammes se construisent de bas en haut. J'aime particulièrement ce principe, car le timer lent ne fonctionne pas tant que vous n'appliquez pas votre doigt sur les contacts. La résistance entre les contacts sera presque infinie, empêchant le condensateur de temporisation de se charger. Un interrupteur de démarrage n'est donc pas utile. Vous alimentez votre circuit qui attend que vous posiez votre doigt.

Idéalement, il devrait également s'arrêter de lui-même. Quand la dernière rangée des hexagrammes est générée, je peux prélever une tension pour activer la broche de réinitialisation du timer lent afin qu'il cesse de produire des impulsions. Pour cela, je dois convertir le niveau haut de la dernière rangée en niveau bas pour

la broche de réinitialisation, mais un simple transistor peut s'en charger. Dans le cas où tout ne serait pas clair, j'ai résumé la suite des commandes du circuit dans un diagramme logique, sur la fig. 28-7.

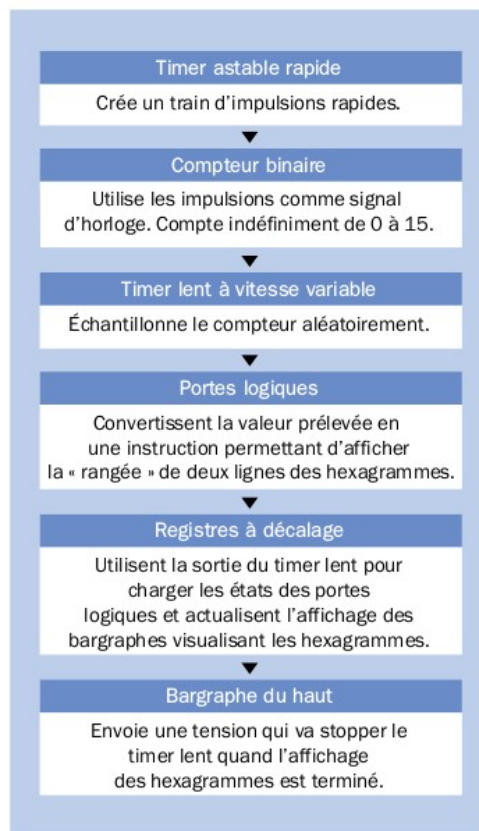


Figure 28-7. Le principe de base du *Yi Jing* électronique est mis en évidence dans ce diagramme logique.

Une question subsiste. Pourquoi y a-t-il un troisième registre sur la fig. 28-6 ? Remarquez que ses sorties pilotent les deux barres lumineuses à l'extérieur des bargraphes de chaque hexagramme. Ces barres seront toujours illuminées, indépendamment de l'état de la ligne centrale. J'aurais pu connecter ces barres en permanence au pôle positif de l'alimentation, mais l'affichage des hexagrammes sera plus agréable si chaque rangée est allumée séquentiellement du bas vers le

haut. Le troisième registre à décalage n'est donc utilisé que pour rendre l'affichage plus agréable. Son entrée de données est reliée en permanence au niveau haut et il pousse le niveau positif du bas vers le haut à chaque impulsion d'horloge, en synchronisation avec les autres registres à décalage.

Précisions

J'ai omis quelques détails dans ce circuit. En premier lieu, vous pourriez ajouter un bouton de réinitialisation qui appliquerait une impulsion à chaque entrée de remise à zéro (*clear*) des trois registres à décalage. Le registre à décalage 74HC164 exigeant un niveau bas pour sa remise à zéro, cette broche doit être maintenue au niveau haut par une résistance de rappel reliée au pôle positif de l'alimentation, et un poussoir les relie momentanément à la masse.

Deuxièmement, le circuit 74HC4078, simple porte OR à huit entrées est considéré comme obsolète chez certains fournisseurs. Je l'ai vu encore en vente pour moins d'un euro, mais il deviendra plus difficile de se le procurer à l'avenir. Par chance, l'ancien CMOS 4078B est toujours disponible en grande quantité et peut le remplacer car il doit fournir très peu de courant de sortie. Vous pouvez donc utiliser indifféremment le 74HC4078 ou le 4078B.

Ces deux circuits comportent en fait une porte NOR suivie d'un inverseur (*inverter*), ce qui équivaut à une porte OR. La sortie OR et la sortie NOR sont toutes deux disponibles sur des broches séparées, comme le montre la fig. 28-8.

En ce qui concerne le compteur binaire, vous pouvez utiliser le même circuit 4520B que dans l'expérience 21. Son brochage est indiqué sur la fig. 21-6.

Barres lumineuses ou LED

Les bargraphes absorbent un courant trop important pour pouvoir être directement reliés aux sorties des registres à décalage. Le registre le plus à droite sur la fig. 28-6 doit allumer quatre barres sur chaque rangée, soit un total de 24 barres lumineuses lorsque les hexagrammes seront entièrement affichés. À raison de 20 mA par barre, on atteint presque un total de 500 mA.

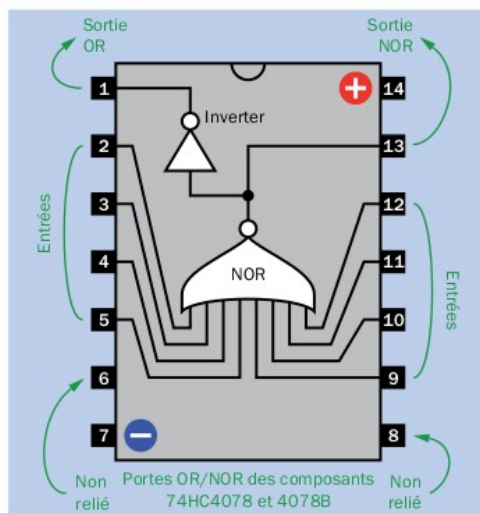


Figure 28-8. Brochage du 74HC4078 et du 4078B pouvant être indifféremment utilisés dans le circuit du Yi Jing électronique. Ces circuits intégrés offrent le choix entre une sortie OR ou une sortie NOR.

Vous pourriez faire avec en utilisant le registre à décalage de puissance TPIC6C596 qui autorise un courant de sortie de 100 mA quand toutes ses sorties sont au niveau haut. Son mode de fonctionnement diffère néanmoins légèrement de celui du 74HC164 et je ne tiens pas à aborder ces différences. Vous pourrez consulter sa fiche technique, si vous décidez de l'utiliser. Je préfère piloter les barres lumineuses avec un réseau de transistors Darlington, par exemple le ULN2003 qui contient des transistors à même de fournir un courant de 500 mA sur chacune de ses sept sorties. Le brochage de l'ULN2003 est indiqué sur la fig. 28-9. Notez que chaque paire de transistors Darlington a une sortie en collecteur ouvert, qui ne fournit donc pas de courant mais en absorbe.

La broche 8 doit être reliée à la masse afin de pouvoir absorber le courant. La connexion optionnelle de la broche 9 à la masse est uniquement nécessaire si l'utilisation d'une charge inductive génère un pic de tension inverse dû au comportement de son inductance lorsqu'elle s'oppose à l'annulation du courant qui la traverse. Les diodes intégrées au circuit ULN2003 permettent d'absorber ces pics de tension. Pour un circuit alimentant des bargraphes, cette connexion n'est pas requise.

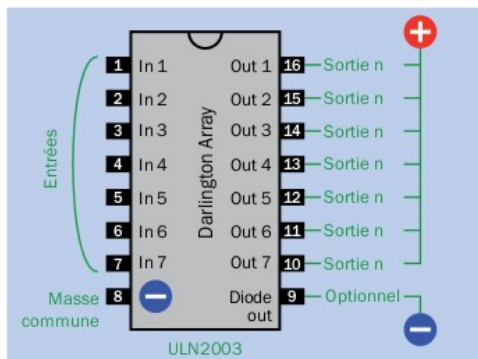


Figure 28-9. Brochage du réseau Darlington contenant sept paires de transistors, chacune capable d'absorber un courant allant jusqu'à 500 mA.

Vous pouvez réduire légèrement la consommation des bargraphes, tout en supprimant le travail de souder des résistances en série. La plupart des bargraphes contiennent un réseau de LED, chacune étant accessible individuellement par une connexion externe. En utilisant le bargraphe LTL-2450Y de Lite-On, j'ai découvert qu'en connectant les LED en série, en reliant les fils deux par deux, comme sur la fig. 28-2, je pouvais les alimenter en 9 volts et qu'ils n'absorbaient que 16 mA ce qui est inférieur à leur intensité nominale spécifiée de 20 mA. Cela requiert une alimentation de 9 V DC. Vous pouvez alimenter le circuit en 9 V DC ce qui conviendra aux réseaux de transistors Darlington. En revanche, n'oubliez pas de prévoir un régulateur de tension LM7805 pour alimenter les circuits intégrés logiques par une tension de 5 V DC.

Des exemples de schémas montrant les trois façons possibles de connecter les LED par un réseau de transistors Darlington, sont représentés sur la fig. 28-10.

Ces différentes options peuvent être réduites à deux possibilités.

1. Pour un circuit complet

- Utilisez les registres à décalage 74HC164 étudiés au début de cette expérience.
- Ajoutez un réseau de transistors Darlington ULN2003 afin d'amplifier le courant des sorties de chaque registre à décalage.
- Utilisez le bargraphe Lite-On LTL-2450Y ou un équivalent en reliant ses quatre LED en série.

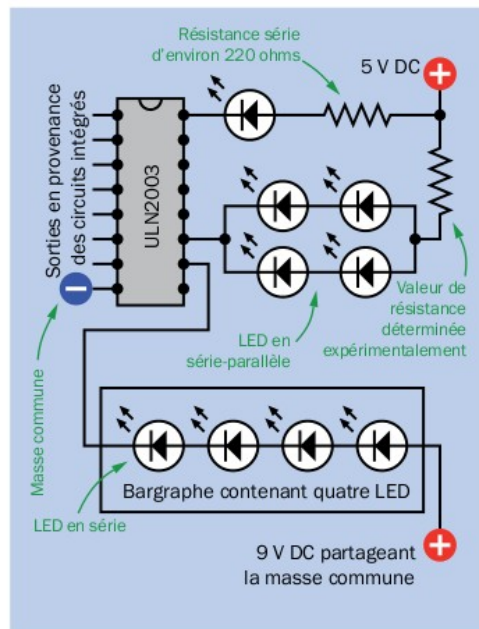


Figure 28-10. Trois façons différentes de relier les LED à un réseau de transistors Darlington.

- Alimentez les bargraphes par une tension de 9 V DC non régulée. Le reste du circuit doit avoir une alimentation de 5 V DC, que vous pourrez obtenir en abaissant la tension de 9 V à l'aide d'un régulateur de tension de cinq volts LM7805.

2. Pour un circuit de démonstration

- Remplacez les bargraphes par des diodes LED. Chaque LED ne devra pas absorber plus de 8 mA.
- Reliez les quatre LED externes de chaque rangée des hexagrammes en série-parallèle, comme dans la configuration centrale de la fig. 28-10.
- Pilotez les LED directement par les registres à décalage 74HC164 en vous assurant que la charge de chacune de leurs sorties ne dépasse pas 8 mA. (L'intensité totale consommée par un circuit intégré 74HC164 ne devra pas dépasser

50 mA.) Les réseaux de transistors Darlington ne sont pas nécessaires.

- Alimentez le circuit en 5 V DC.

Quoi qu'il en soit, sachez que le circuit consomme trop de courant pour être alimenté par une pile.

Réalisation du Yi Jing électronique

Le circuit complet étant trop important pour tenir sur une seule plaque de montage, j'ai donc dû le scinder en deux parties, 1 et 2. Le schéma de la première partie est représenté sur la fig. 28-11. Cette section du circuit sera la même pour la version complète et pour la version de démonstration. J'ai décalé les circuits intégrés sur le schéma pour que l'ensemble puisse tenir sur la plaque.

Le schéma de la seconde partie du circuit se trouve sur la fig. 28-12. Il s'agit de la version de démonstration, où les trois registres à décalage pilotent directement les LED. Pour la mettre au niveau de la version complète, des réseaux de transistors Darlington doivent être ajoutés aux sorties des registres à décalage et les LED remplacées par des bargraphes. On utilise une alimentation secteur 9 V DC pour alimenter les bargraphes.

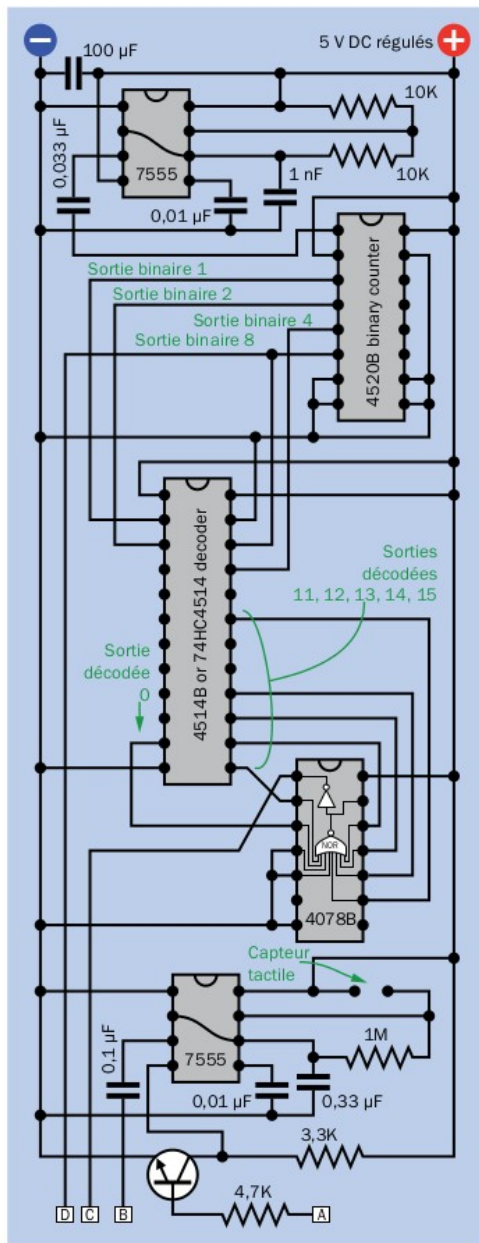
En raison du manque de place, sur le schéma, j'ai dû, avec regret, placer de nombreuses liaisons proches les unes des autres sur la fig. 28-12. En utilisant une règle le long de chaque liaison, vous pourrez plus facilement voir quelles LED chaque ligne commande.

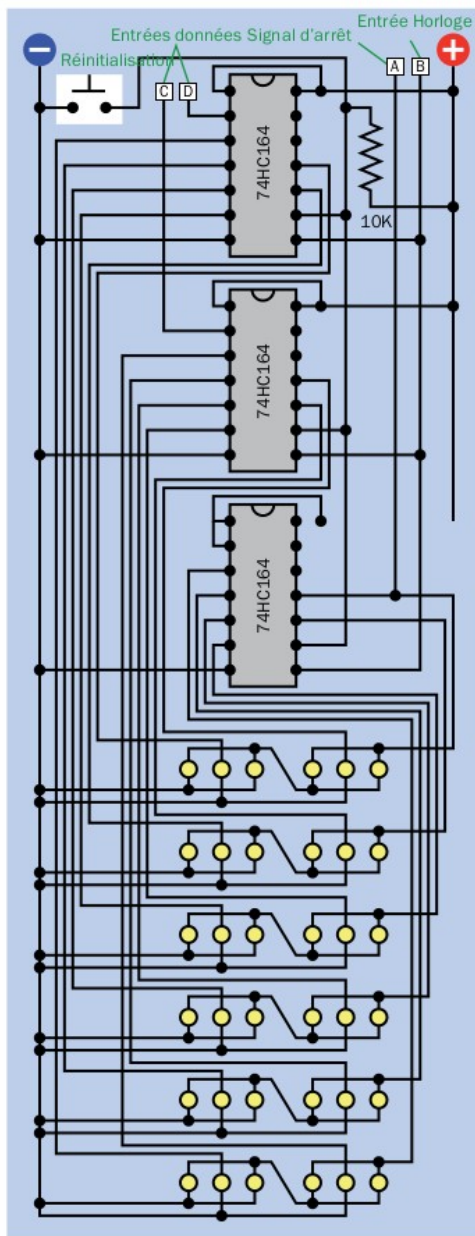
Toujours en raison du manque de place, j'ai représenté les LED par des ronds jaunes, j'ai également omis les résistances qui pourraient être requises.

Toutes les LED ont leur pôle positif (anode) en haut, leur pôle négatif (cathode), en bas.

Les LED qui sont toujours allumées à gauche et à droite de chaque hexagramme sont reliées en série-parallèle, et si elles ne contiennent pas leur propre résistance, elles auront besoin d'une résistance en série dont la valeur sera différente de celle que vous utilisez pour les LED individuelles. Dans ces deux cas, essayez plusieurs valeurs en vérifiant la valeur de l'intensité qui les traverse.

Figure 28-11 Première partie du schéma du Yi Jing électronique qui sera commune à la version complète et à la version de démonstration du circuit.





Chaque LED alimentée séparément et chaque groupe de LED en série-parallel ne doit pas absorber plus de 8 mA.

Vous voyez, sur la fig. 28-13, comment câbler les LED et leurs résistances série sur une platine de montage, en utilisant le minimum de place. Les six LED représentent une rangée pour les deux hexagrammes. Elles sont numérotées afin d'indiquer quel registre à décalage les commande. Les traits gris épais représentent les connexions internes à la plaque de montage.

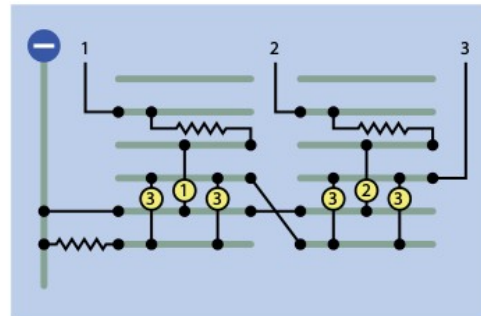


Figure 28-13. Façon de câbler les deux LED pilotées individuellement par les registres à décalage 1 et 2, et les quatre LED reliées en série-parallel pilotées par le registre 3. Si vos LED n'ont pas de résistance incorporée, choisissez des résistances afin que chaque LED ne consomme pas plus de 8 mA.

Cette configuration n'utilise que cinq rangées de trous de connexions, permettant aux six groupes de LED d'occuper trente rangées de la plaque de montage. Cela laisse assez de place sur la partie supérieure de la platine pour y placer les registres à décalage. Le circuit de démonstration terminé est présenté sur la fig. 28-14 et sur la fig. 28-15, page suivante.

Figure 28-12. Seconde partie du schéma du Yi Jing électronique (version de démonstration avec des LED au lieu des bargraphes).

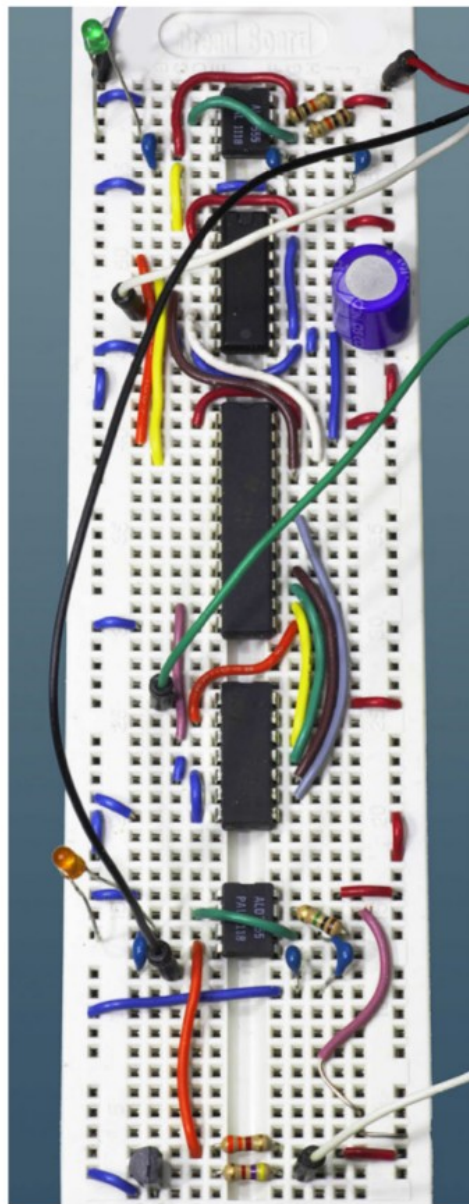


Figure 28-14. Première partie des circuits logiques du Yi Jing électronique.

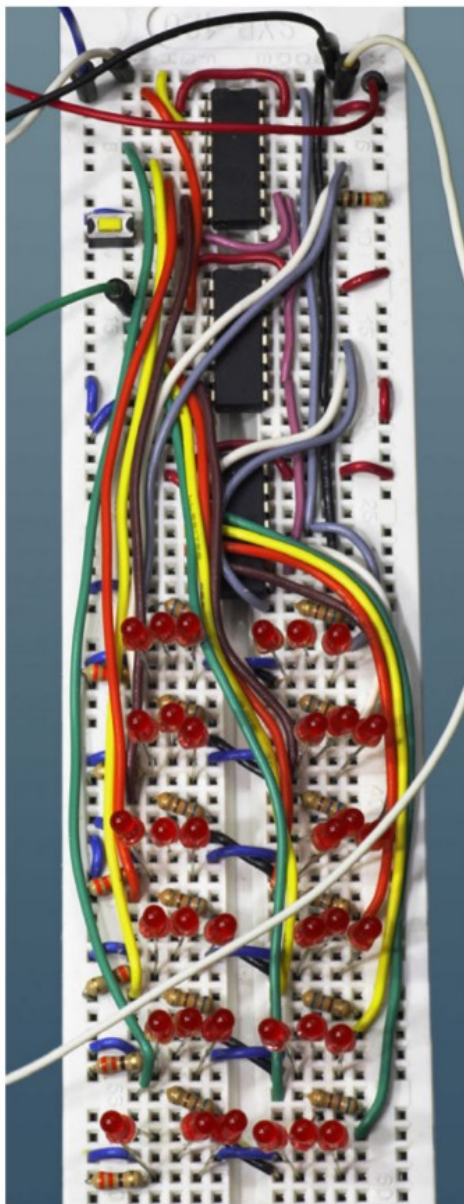


Figure 28-15. Deuxième partie des circuits du Yi Jing électronique.

Assemblage et vérifications

S'agissant d'un projet relativement important, il est recommandé de vérifier les deux parties au fur et à mesure que vous les câblez. Quand j'ai réalisé ma version de test, j'ai suivi les étapes suivantes, en commençant par les LED, puis en remontant vers le début du circuit.

1. Sur la deuxième plaque de montage, placez toutes les liaisons et les résistances en relation avec les LED. Installez ensuite les LED et appliquez une tension à chacune d'elles afin de vérifier qu'il ne subsiste pas de connexions défectueuses.
2. Installez les trois registres à décalage et reliez-les aux LED. Déclenchez manuellement les registres à décalage en utilisant les entrées C et D (dans le schéma), pour leur charger des données en leur envoyant des impulsions d'horloge par l'entrée B. Vous pourriez avoir des difficultés à injecter un signal d'horloge propre à l'entrée B. Essayez de la mettre à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de 10K, puis de la relier très brièvement à un fil du pôle positif de l'alimentation.
3. À côté, préparez la seconde plaque de montage. Installez le timer rapide 7555 en haut de cette platine. Utilisez un condensateur de 33 μF au lieu de 1 nF pour ralentir le timer, le temps de réaliser les tests. Laissez ce condensateur en place jusqu'à l'étape 10. Ajoutez une LED à la sortie du timer.
4. Ajoutez le compteur binaire. Contrôlez-le à l'aide de LED reliées à ses sorties, avec une résistance en série de forte valeur, évitant d'absorber plus de 2 mA.
5. Ajoutez le décodeur et utilisez également des LED avec des résistances de forte valeur, pour vérifier ses sorties.
6. Ajoutez la porte OR/NOR et utilisez de nouveau une LED avec une résistance de forte valeur pour vérifier sa sortie. Les sorties OR devraient être au niveau haut pour les valeurs binaires 1011, 1100, 1101, 1110, 1111, et 0000, des sorties du décodeur.
7. Vérifiez le timer lent 7555 à l'aide d'une LED. La LED devrait s'allumer dès que vous alimentez le circuit. Si c'est bon, humectez votre doigt et appuyez-le sur les contacts du capteur tactile (qui peut être qu'une simple paire de fils dénudés). Les contacts ne devraient pas être éloignés de plus de 2 mm à 3 mm l'un de l'autre. Au bout d'une seconde ou

deux, la LED devrait s'éteindre puis se rallumer à nouveau.

8. Ajoutez le transistor et les connexions entre les deux platines.
9. Retirez toutes les LED des circuits intégrés du compteur, du décodeur et de la porte OR/NOR. C'est important ! En effet, si ces circuits pilotent les LED à grande vitesse, ils seront incapables de communiquer correctement entre eux.
10. Remplacez le condensateur de 33 μF par celui de 0,001 μF sur le temporisateur rapide 7555.
11. N'oubliez pas de relier les deux bus d'alimentation positive et les deux bus de la masse de vos deux plaques afin qu'elles soient alimentées quand vous serez prêt pour le test final. Dans votre empressement à découvrir s'il fonctionne, prenez garde à ne pas inverser les fils d'alimentation.

Utilisation du Yi Jing électronique

Le condensateur de 100 μF (placé en haut et à gauche, sur la fig. 28-11) devrait supprimer tous les pics de tension apparaissant quand l'alimentation est connectée. Si le condensateur joue bien son rôle, toutes les LED devraient être éteintes. Si certaines sont allumées, utilisez le bouton de réinitialisation de la deuxième plaque.

Appuyez votre doigt sur les contacts du capteur tactile. Pour une action plus rapide, humidifiez-les au préalable. Soyez patient ; il faut une seconde ou deux pour charger le condensateur. La sortie du timer passe au niveau bas, puis à nouveau au niveau haut, après quoi la première rangée de l'affichage devrait apparaître. Ce cycle devrait se répéter six fois puis s'arrêter. Si l'affichage continue à progresser de bas en haut, vérifiez, à l'aide de votre multimètre, la tension à la broche de réinitialisation du temporisateur lent. Elle devrait être supérieure à 4,5 V pendant la génération de l'affichage, puis être inférieure à 0,5 V DC quand l'affichage est complet.

Si vous débranchez l'alimentation, puis la reconnectez, il y aura probablement une tension suffisante aux bornes du condensateur de 100 μF pour permettre à l'affichage de se régénérer. Il est nécessaire de laisser le circuit au repos, sans alimentation, pendant environ une minute, pour permettre au condensateur de se décharger.

Il est inévitable de devoir utiliser des fils de pontage de grandes longueurs pour relier les deux platines. Les fils avec des embouts de connexion à chaque extrémité peuvent provoquer des faux contacts. Si votre circuit se comporte de façon erratique, la première vérification à mener concernera la qualité des liaisons.

Réalisation finale

Un exemple du *Yi Jing* électronique terminé, affichant un couple d'hexagrammes, est représenté sur la fig. 28-3. La fig. 28-16 indique les découpes à réaliser, sur le dessus du coffret.

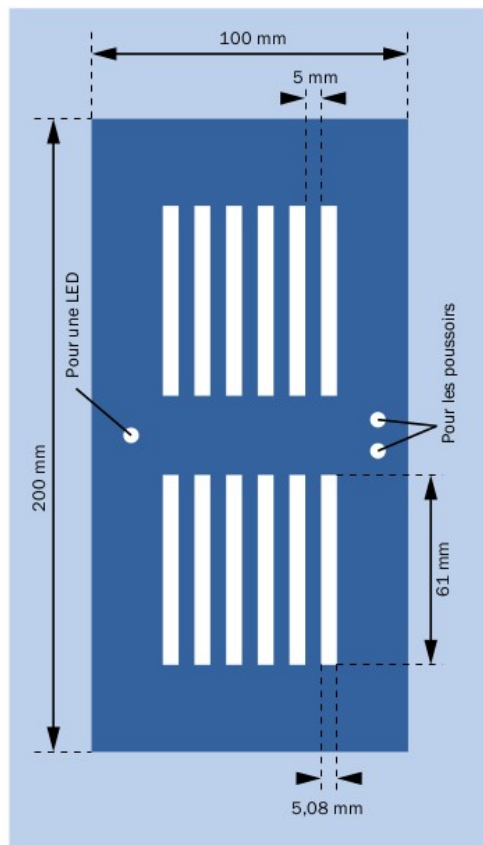


Figure 28-16. Découpes à réaliser sur la face supérieure du coffret à utiliser pour le *Yi Jing* électronique.

Ce projet n'est pas aussi ambitieux qu'il y paraît, car les liaisons aux circuits intégrés sont relativement simples. La majeure partie du câblage est en relation avec l'affichage des hexagrammes. Cela se complique un peu si vous utilisez des réseaux de transistors Darlington. Il existe aussi une préoccupation relative au coût : si vous utilisez des bargraphes, il vous en coûtera plusieurs dizaines d'euros pour ce projet.

En revanche, pour autant que je sache, cette version électronique du *Yi Jing*, le plus ancien système de prédictions, est unique.

Peut-il fonctionner de façon comparable à la version utilisant les tiges d'achillée millefeuille ? Il y a sûrement quelque chose d'irrésistible dans le lancer des baguettes puis dans la détermination manuelle des hexagrammes. Si vous pensez que le sort est à l'origine de la position des baguettes, le sort pourrait tout aussi bien agir sur le comportement des électrons à l'intérieur des circuits électroniques.

Cela m'amène à la conclusion : que votre futur soit électriquement positif !

Dans cette expérience et les cinq suivantes, je vais aborder les capteurs. C'est un domaine fascinant car il est en pleine évolution. Alors que le développement des circuits intégrés logiques a débuté il y a longtemps, l'évolution des capteurs abordables se poursuit un peu partout.

Le mot-clé est « abordable ». Pour prendre un exemple, en l'an 2000, j'aurais probablement pu acheter un accéléromètre en cherchant un peu, mais en rencontrant des difficultés à trouver un distributeur acceptant de m'en vendre un seul, et à un prix très élevé. Par ailleurs, après en avoir fait l'acquisition, il m'aurait été tout aussi difficile de savoir exactement comment l'utiliser correctement.

Aujourd'hui, je peux acheter un accéléromètre trois axes en Asie pour quelques euros, frais de port compris, prévu pour se relier à un microcontrôleur Arduino.

Les évolutions des appareils portables a dynamisé la production massive de capteurs miniatures, fiables, faciles à mettre en œuvre et peu coûteux. Un smartphone moderne peut contenir jusqu'à dix capteurs différents, dont un microphone, un écran tactile, une antenne Wi-Fi, un récepteur GPS, un capteur de luminosité ambiante (pour régler automatiquement la luminosité de l'écran), un accéléromètre (pour connaître l'orientation de l'appareil), un thermomètre, un baromètre, un hygromètre et un détecteur de proximité lui permettant d'éteindre l'écran et de désactiver le clavier pour économiser la batterie quand vous tenez votre appareil à l'oreille.

L'univers des capteurs est si grand que je n'aurais pas assez de place pour en décrire davantage que quelques-uns. Utilisez le terme de recherche « sensor » sur des sites Internet comme <http://www.jameco.com> et

<http://www.sparkfun.com> et vous serez surpris de tout ce que vous y trouverez.

L'interrupteur magnétique miniature

L'interrupteur magnétique à lames souples ou interrupteur Reed est sans doute le plus ancien des capteurs. Je l'ai rapidement évoqué dans *L'Électronique en pratique* en abordant son utilisation dans les systèmes d'alarme, où il se présente sous forme d'un petit boîtier en plastique utilisé pour détecter l'ouverture d'une fenêtre ou d'une porte. Je vais l'étudier plus en détail ici.

Découvrez, dans un premier temps, quelques exemples de ces petits composants très utiles. Deux interrupteurs magnétiques Reed sont photographiés sur la fig. 29-1.

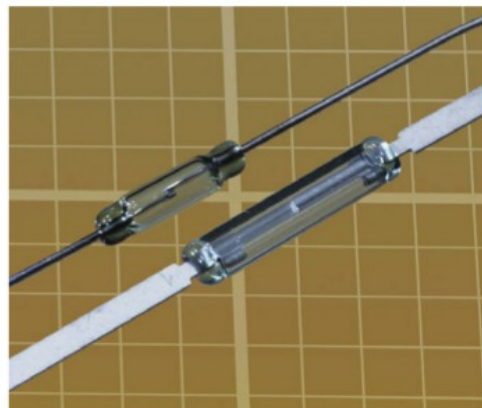


Figure 29-1. Interrupteurs magnétiques Reed. Les carrés du fond font 2,54 mm de côté.

Le tube de verre contient un gaz neutre protégeant les contacts de l'oxydation. C'est une disposition intéressante, mais le verre est si fragile et si mince qu'il est fréquent de la casser en tordant les fils de façon trop importante. Prenez soin de manipuler les interrupteurs Reed avec précaution. Si vous préférez un modèle plus solide, certains interrupteurs sont protégés par un boîtier en plastique comme celui de la figure fig. 29-2.



Figure 29-2. Certains interrupteurs Reed comme celui-ci sont encapsulés dans un boîtier de protection en plastique.

Test d'un interrupteur Reed

L'expérience suivante est la plus simple de ce livre, probablement plus simple que la première expérience utilisant un transistor avec de la colle blanche.

Bien qu'il n'existe aucun symbole normalisé pour un interrupteur Reed, on le représente souvent comme sur la fig. 29-3. Reliez-le comme indiqué et approchez un petit aimant du contact. Les couleurs magenta et cyan identifient les pôles de l'aimant.

Vous devriez constater que l'interrupteur aura la même sensibilité dans les figures du haut et du milieu. En revanche, il sera moins sensible dans la configuration du bas. Il s'agit d'un point important si vous souhaitez qu'un interrupteur Reed réagisse de façon fiable.

Bien qu'il soit appelé « interrupteur », un interrupteur Reed se comporte comme un bouton-poussoir. Il ne demeure fermé que lorsqu'il est soumis à l'action d'un champ magnétique. Quand l'aimant est éloigné du contact, celui-ci s'ouvre.

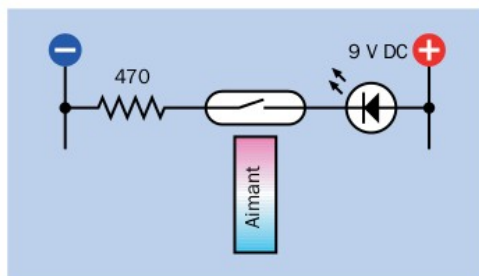
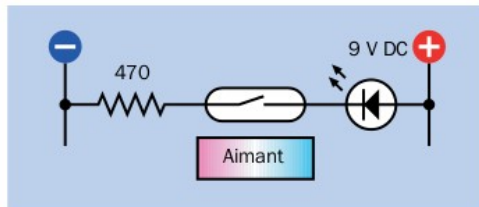
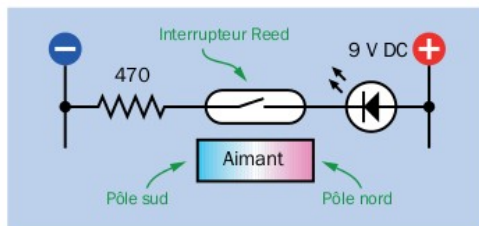


Figure 29-3. Test d'un interrupteur magnétique à lames souples.

Fonctionnement

Les contacts à l'intérieur de l'interrupteur sont constitués de lames souples (*reeds*, ou roseaux en français), qui ne sont pas magnétisées mais sont en matériau magnétique. Rappelez-vous qu'un aimant crée un champ magnétique qui se propage et provoque un magnétisme chez les objets voisins. En fait, quand un aimant attire vers lui un morceau d'acier, le pôle de l'aimant le plus proche crée un pôle opposé temporaire dans l'acier.

Si un aimant est placé parallèlement à l'interrupteur, les lames deviennent temporairement magnétisées avec leurs pôles opposés. Cela crée une force d'attraction mutuelle provoquant la flexion des lames, et produisant un contact électrique. Quand le champ magnétique est supprimé, les lames se rétractent. La raison

pour laquelle l'interrupteur est à peu près aussi sensible quand l'aimant est orienté comme sur les dessins du haut et du centre de la fig. 28-3 tient au fait que les lames sont magnétisées l'une par rapport à l'autre dans chaque cas. Même quand le champ est inversé, elles continuent à s'attirer mutuellement.

Capteur de niveau

Il y a quelques années, je devais réaliser un système de refroidissement rapide pour un laboratoire de recherche. Pour cela, j'avais besoin d'un capteur de niveau de liquide. Le type le plus simple est un dispositif ouvert ou fermé, appelé flotteur, détectant si un liquide dépasse un niveau donné. Un flotteur cylindrique composé de mousse plastique reste en surface du liquide. Le flotteur a un trou en son centre, comme un « donut » lui permettant de glisser librement de haut en bas d'une tige en plastique contenant un interrupteur à lames souples. L'interrupteur Reed est actionné par un petit aimant inséré dans le flotteur en plastique. Un tel capteur, très économique, est photographié sur la fig. 29-4.



Figure 29-4. Capteur de niveau liquide économique dans lequel un aimant, placé à l'intérieur du flotteur, active un interrupteur à lames souples situé dans l'axe en plastique.

Vous imaginez peut-être quelques applications de ce capteur. Par exemple, malgré des décennies d'améliorations, les mécanismes des chasses d'eau des toilettes ne sont toujours pas fiables. Là où je vis, dans une région désertique, l'eau est un bien précieux et un mécanisme de chasse d'eau défectueux est préjudiciable. Je pourrais installer un capteur de niveau à l'intérieur du réservoir, relié à une LED alimentée par une pile de 9 V. Ainsi, en cas de défaut de la soupape de retenue de l'eau, la diode LED me préviendrait. Mieux, encore, je pourrais utiliser un buzzer.

Voici un autre exemple. Certaines personnes vivent dans des logements dont la cave est sujette aux inondations ; il serait intéressant de disposer d'un capteur de niveau dans cette situation. À quelles autres utilisations pourriez-vous penser ?

Jauge de carburant

Dans certaines applications, il est utile d'avoir un capteur de niveau délivrant une sortie proportionnelle au volume du liquide, au lieu d'une simple indication de niveau minimal. C'est le cas des jauges de carburant.

Traditionnellement, on réalise cela à l'aide d'un flotteur monté au bout d'un levier qui déplace le curseur d'un potentiomètre. Les automobiles utilisent ce système dans leurs réservoirs depuis des décennies, mais il est encombrant, peu précis, et s'avère sensible aux salissures et à l'humidité, si vous l'utilisez dans des environnements non clos.

En réfléchissant à une meilleure solution pour mesurer le niveau d'un liquide, j'ai trouvé, sur eBay, une jauge à carburant constituée d'une tige métallique autour de laquelle un flotteur se déplaçait verticalement. Ne saisissant pas son fonctionnement, j'en ai commandé une. Quand je l'ai reçue, j'ai scié l'extrémité de la tige et j'ai découvert qu'il s'agissait d'un tube creux. À l'intérieur se trouvait un petit circuit imprimé d'environ 6 mm de largeur. Sept interrupteurs Reed étaient placés à distances égales sur ce circuit, ainsi que six résistances. J'étais d'abord surpris. Comment les interrupteurs pouvaient-ils être actionnés alors qu'ils étaient placés dans un tube en acier ? J'ai alors compris que le tube était en acier inoxydable, qui est un matériau amagnétique. Le champ créé par un petit aimant monté sur le flotteur mobile pouvait donc pénétrer à l'intérieur du tube jusqu'aux interrupteurs magnétiques.

Le flotteur se déplaçant verticalement, le champ magnétique activait les interrupteurs l'un après l'autre. Les résistances étant reliées en série, elles formaient un diviseur de tension à six positions. Une broche de contact au sommet du tube permettait de disposer d'une résistance variable selon le niveau du liquide. Une version simplifiée de ce détecteur de niveau, comportant quatre résistances et cinq interrupteurs Reed, est représentée sur la fig. 29-5.

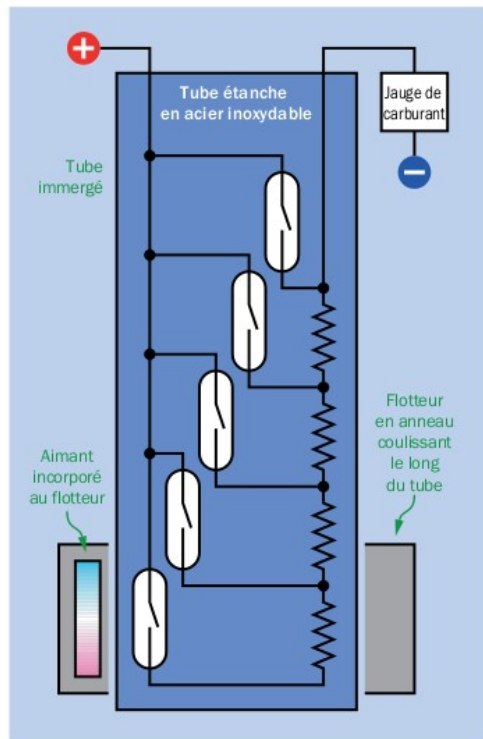


Figure 29-5. Capteur de niveau de liquide utilisant des interrupteurs magnétiques et des résistances formant un diviseur de tension à plusieurs étages.

Il est évident que la résistance de ce type de capteur ne varie pas graduellement, mais sept niveaux sont acceptables pour la jauge de carburant d'une automobile.

J'ai mentionné cet exemple afin de vous donner une idée de la diversité des applications d'un simple interrupteur à lames souples. Je crois qu'en fait de

nombreuses jauges d'automobiles appliquent un principe identique, excepté qu'elles utilisent dorénavant des capteurs à effet Hall plutôt que des interrupteurs Reed. J'utiliserai des capteurs à effet Hall dans l'expérience 30.

En bref : les interrupteurs magnétiques

- La plupart des interrupteurs Reed sont de type SPST avec des contacts normalement ouverts. Certains ont des contacts fermés au repos. Quoi qu'il en soit, un interrupteur Reed se comporte comme un bouton poussoir, l'aimant simulant « l'appui ».
- Il existe également des interrupteurs Reed SPDT et DPDT. La fig. 29-6 présente un interrupteur à inverseur unique (SPDT). Le contact commun est relié au fil unique situé à une de ses extrémités. Le fil le plus long des deux sorties de l'extrémité opposée est relié au contact normalement fermé.

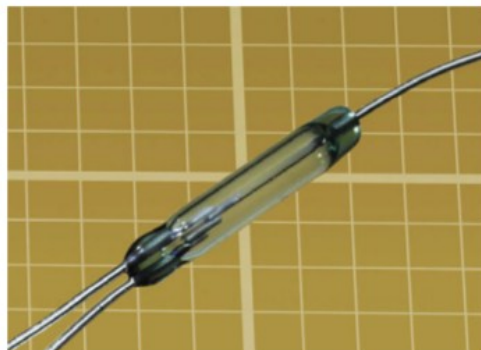


Figure 29-6. Interrupteur Reed inverseur (SPDT).

- Un interrupteur à lames souples fonctionne quelle que soit la polarité du champ magnétique, en raison de la création de pôles magnétiques opposés à l'intérieur de l'interrupteur.
- Il existe plusieurs types de relais contenant un interrupteur Reed entouré par une bobine. Lorsque la bobine est alimentée, elle se comporte comme un électro-aimant et ferme le contact.
- Les interrupteurs Reed possèdent bien entendu une hystérésis. L'énergie nécessaire à la fermeture du contact est plus importante que l'énergie nécessaire à le maintenir fermé. Ainsi, l'aimant qui ferme

le contact peut être légèrement éloigné avant que le contact ne puisse s'ouvrir.

Les interrupteurs magnétiques à lames souples présentent évidemment des limites.

- Un interrupteur Reed est habituellement enfermé dans une ampoule de verre qui peut se fêler ou se casser facilement.
- Les contacts minuscules se détérioreront rapidement si vous commutez un courant trop important.
- Les contacts peuvent se casser s'ils sont soumis à des vibrations trop intenses. Évitez de les laisser tomber, en particulier sur un sol en ciment ou en carrelage.
- Les interrupteurs Reed sont néanmoins conçus pour une durée de vie importante, bien qu'ils ne soient jamais aussi durables que les interrupteurs électroniques (quoi qu'en disent les fabricants).
- L'interrupteur peut être accidentellement déclenché par un champ magnétique environnant.
- Si le champ magnétique n'est pas correctement orienté, il peut ne pas s'activer.
- Quand les contacts d'un interrupteur Reed se ferment, ils génèrent des vibrations provoquant des rebonds. Ce problème est bien connu dans les interrupteurs Reed de grande taille qui ont des lames à forte dynamique. Les rebonds des contacts peuvent être interprétés par erreur comme des successions de contacts par les circuits digitaux.

Les interrupteurs Reed ont cependant quelques avantages par rapport aux interrupteurs électroniques.

- Ils ne nécessitent pas d'alimentation.
- Ils ne consomment pas d'énergie quand l'interrupteur est ouvert ou fermé.
- Ils n'ont nul besoin de circuit d'interfaçage, d'amplification ou autre.
- Le courant de fuite d'un contact ouvert est négligeable.
- La résistance d'un contact fermé est négligeable.
- Des versions supportant des tensions élevées sont disponibles.
- Il existe également des types supportant des intensités de coupures élevées.

- Ils peuvent commuter du courant continu aussi bien que des tensions alternatives.
- Ils sont moins vulnérables aux décharges électrostatiques.
- Enfin, ils ne sont pratiquement pas sensibles à la température ambiante.

Substitution facile

On peut généralement choisir un interrupteur Reed à la place de n'importe quel interrupteur SPST. Par exemple, les interrupteurs à lames souples sont souvent utilisés pour les contacts de fin de course arrêtant un moteur qui atteint sa position limite. Vous pourriez remplacer les seize paires de contacts du jeu de la fente magique de l'expérience 21 par seize interrupteurs magnétiques. Le reste du circuit ne nécessiterait pas de modification. Le seul problème serait de ne plus pouvoir jouer avec des pièces de monnaie, mais avec seize jetons magnétiques.

Je pense qu'il existe, en fait, une meilleure solution en utilisant des capteurs vous permettant de continuer à jouer avec des pièces. J'y viendrai dans l'expérience 31 quand j'aborderai les capteurs optiques.

Installation d'un interrupteur magnétique

Les interrupteurs à lames souples sont disponibles selon différentes sensibilités. Les exemples que j'ai utilisés peuvent être actionnés à l'aide d'aimants miniatures au néodyme mesurant environ $3,5 \times 6,5 \times 1,6$ mm. Si l'axe magnétique de l'aimant est parallèle aux contacts de l'interrupteur, celui-ci fonctionnera jusqu'à une distance d'environ 13 mm de l'aimant.

Les aimants miniatures couplés aux interrupteurs Reed offrent beaucoup de souplesse dans leur utilisation. Un interrupteur peut par exemple être collé à un endroit et son aimant caché par une petite pièce en plastique.

Pour la plupart des projets de ce livre, vous pourriez construire un coffret qui semble se mettre en marche seul quand vous soulevez le couvercle. Remarquez que l'interrupteur ne consommerait aucun courant, que le couvercle soit ouvert ou fermé.

Les interrupteurs Reed peuvent aussi être utilisés dans les systèmes de sécurité de votre voiture ou de votre logement. Vous pourriez, par exemple, attacher un

aimant miniature à votre porte-clés (attention de le tenir éloigné de votre carte de crédit), qui actionnerait un interrupteur Reed caché, relié à un relais à verrouillage, et désactiverait votre système d'alarme avant d'entrer.

Autre possibilité, attacher un aimant à un stylo ou à un stylet, qui commanderait un jeu.

Fondamentaux : la polarité magnétique

Les aimants étant utilisés pour actionner les interrupteurs Reed et les capteurs à effet Hall (que nous étudierons très prochainement), je vais en décrire quelques aspects.

Un aimant permanent a toujours deux pôles, identifiés par nord et sud. Vous pensez sans doute qu'ils sont équivalents aux pôles de la planète Terre, mais permettez-moi de vous préciser qu'à l'origine, le pôle nord d'un aimant était appelé « pôle de recherche du nord ».

N'avez-vous pas appris que les pôles opposés s'attiraient ? En réalité, si vous avez deux aimants, le pôle nord de l'un d'eux sera attiré par le pôle sud de l'autre. En ce cas, comment le « pôle de recherche du nord » peut-il être attiré par le pôle nord de la Terre ? La réponse est que le pôle nord de la Terre a, en fait, une polarité sud.

Il aurait été trop perturbant de renommer le pôle nord, pôle sud, aussi restons-en au pôle nord qui n'est pas du tout un pôle nord.

Types d'aimants et approvisionnement

Les aimants au Néodyme, nettement plus puissants que les aimants en acier qui les ont précédés, ont été développés dans les années 1980. À l'intérieur des petits moteurs à courant continu, vous ne trouverez plus que des aimants au néodyme. En fait, le néodyme a permis la miniaturisation des appareils, depuis les appareils photographiques jusqu'aux outils électroportatifs légers.

Il est amusant de jouer avec des aimants puissants, les interrupteurs Reed sont toutefois tellement sensibles que des aimants peu coûteux leur suffisent. Vous trouverez facilement de nombreuses sources d'approvisionnement en ligne. Il y a toujours des assortiments d'aimants en vente sur eBay.

Gardez en mémoire qu'il est désavantageux d'utiliser des aimants plus puissants que nécessaire car ils pourraient perturber les composants ou interrupteurs voisins.

L'aimant le plus courant est certainement le type allongé, de section rectangulaire ou carrée. Habituellement, mais pas toujours, les pôles sont aux extrémités du barreau.

Certains fournisseurs présentent dans leur catalogue la dimension magnétisée des aimants en dernier. Ainsi, si un aimant mesure $6 \times 18 \times 25$ mm, les pôles magnétiques sont probablement situés aux extrémités de la face de 25 mm. En revanche, s'il mesure $2 \times 2,5 \times 0,6$ cm, chacune de ses deux faces pourra être un des pôles. Vérifiez bien avant de commander !

Formes des aimants

Un aimant en forme de fer à cheval ressemble à un barreau plié en forme de « U », et ses deux pôles sont situés côte à côte. Cette forme augmente la force d'attraction d'un aimant, car la puissance est plus importante si la distance entre les pôles est réduite. Quelques exemples d'aimants sont présentés sur la fig. 29-7. Le plus grand, en gris foncé mat, est en acier, tandis que les autres sont en néodyme. Ils sont attachés les uns aux autres car il était impossible de les maintenir séparés pour la photo. Le petit aimant en forme de disque est en deux morceaux car il s'est cassé lorsqu'un autre, plus gros, l'a attiré vers lui. Rappelez-vous, les aimants au néodyme ont un aspect plus brillant.

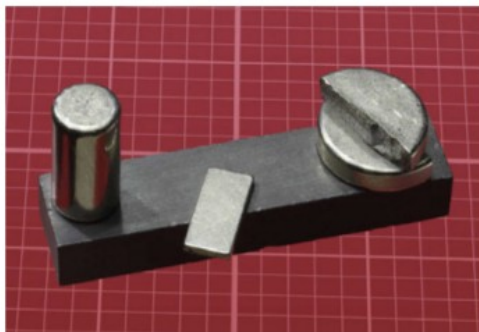


Figure 29-7. Quelques aimants (dont un s'est brisé lorsqu'il a été attiré par un autre). Le gros aimant gris foncé mat est en acier, les autres en néodyme.

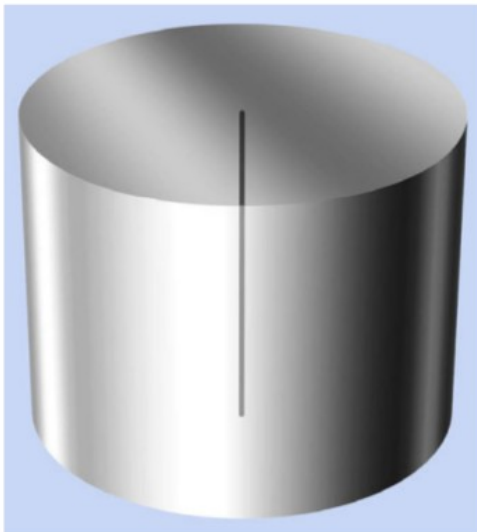


Figure 29-8. L'axe d'un cylindre est la ligne imaginaire passant par son centre.

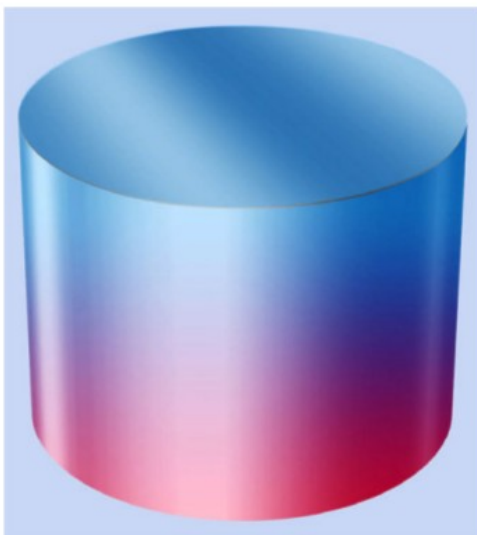


Figure 29-9. Les pôles d'un aimant cylindrique magnétisé selon son axe sont localisés aux extrémités opposées de son axe.

Les aimants en forme de disque, de cylindre, ou d'anneau, sont en général magnétisés selon leur axe. L'axe d'un aimant cylindrique est la ligne imaginaire passant par son centre comme le montre la fig. 29-8. On peut imaginer que le cylindre tourne autour de cette ligne de façon symétrique. S'il est magnétisé selon son axe, les extrémités opposées ont une polarité magnétique opposée. Une des faces du cylindre est le pôle nord, l'autre, le pôle sud, comme vous pouvez le voir sur la fig. 29-9, où les deux pôles sont représentés en bleu et rouge.

La plupart des aimants arrondis sont polarisés selon leur axe, y compris les aimants en forme d'anneau. Sur la fig. 29-10, les aimants en forme d'anneau sont disposés de telle sorte que leurs pôles nord soient en regard, tout comme leurs pôles sud, ayant pour conséquence la création de forces de répulsion. Sur cette photo, les aimants ne sont en aucun cas maintenus sur la tige centrale, ils peuvent glisser librement.



Figure 29-10. La plupart des aimants en forme d'anneau sont magnétisés selon leur axe. Empilez-les sur une tige aimantique (ici, acier inoxydable) en plaçant leurs pôles identiques face à face. Les forces de répulsion ainsi créées les maintiennent éloignés les uns des autres.

L'accumulation des poids des aimants les maintiennent plus rapprochés en bas de la tige. Si vous exercez une force additionnelle avec votre doigt sur l'anneau du bas, vous pouvez déplacer l'ensemble des aimants vers le haut, mais ils reviendront à leur position initiale dès que vous les laisserez libres. En fait, dans cette petite démonstration, l'aimant du haut s'échappera de la tige.

Je ne me lasse jamais de cette expérience élémentaire mettant en évidence les forces magnétiques. Mais d'où vient l'énergie qui permet aux aimants de se comporter ainsi ? La réponse est bien entendu de vous, quand vous les poussez tous ensemble. Un aimant ne crée pas d'énergie, il la stocke.

Une minorité d'aimants cylindriques sont magnétisés radialement. Le principe est illustré sur la fig. 29-11. Un des côtés arrondis du cylindre a une polarité magnétique opposée à celle de l'autre côté.

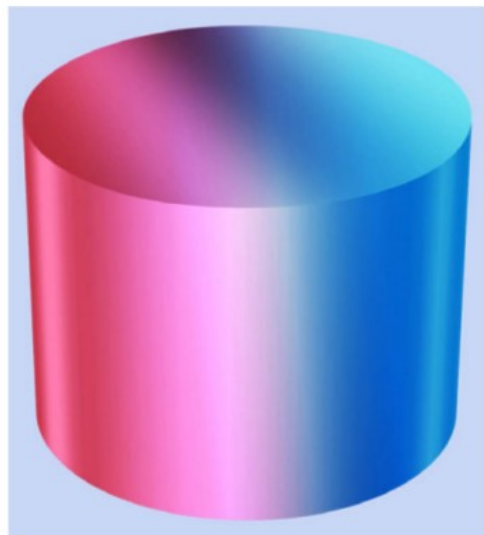


Figure 29-11. Un aimant cylindrique polarisé radialement a ses pôles situés sur les côtés arrondis opposés.

Pour déterminer la polarité d'un aimant, il est utile d'en posséder deux. Il suffit d'observer leur position lorsqu'ils s'attirent ou, au contraire, se repoussent. Si deux aimants cylindriques sont magnétisés axialement, la force qu'ils engendrent en étant placés face à face ne changera pas si l'un d'entre eux est tourné selon son axe, par rapport à l'autre.

Pour aller plus loin : les courants de Foucault

L'un des comportements les plus surprenants des aimants est leur capacité d'interaction avec des métaux non magnétiques, comme l'aluminium. Si vous prenez un aimant en néodyme en forme de bille et que vous le laissez tomber à l'intérieur d'un tube vertical en aluminium de diamètre interne légèrement supérieur à celui de la bille, l'aimant descendra doucement le long du tube, comme s'il se déplaçait dans de la mélasse. Plus le tube d'aluminium sera épais, plus l'aimant sera ralenti. Ainsi, un tube de 3 mm d'épaisseur aura plus d'effet qu'un tube d'une épaisseur d'1 mm. Le même effet peut être mis en évidence avec un tube de cuivre. La fig. 29-12 montre un tube fendu pour visualiser la bille aimantée. Il faut environ une seconde pour que l'aimant descende le long d'un tube vertical de 300 mm. C'est une démonstration visuelle de l'interaction entre un aimant et un métal.



Figure 29-12. Une bille aimantée en néodyme est assez puissante pour générer des courants de Foucault lorsqu'elle se déplace près d'un métal amagnétique mais conducteur électrique, comme le cuivre ou l'aluminium. La génération des courants de Foucault nécessite de l'énergie, ce qui ralentit la chute de la bille.

La raison de cet étrange comportement vient du fait qu'un aimant en mouvement provoque des courants de Foucault dans un conducteur électrique voisin, en aluminium ou en cuivre, par exemple. En réalité, c'est de cette façon que la plupart de l'énergie électrique est produite à travers le monde : en déplaçant des enroulements en cuivre à travers un champ magnétique. (Les cellules solaires sont l'exception à cette règle.)

Si vous vous posez la question du devenir des courants de Foucault générés de la sorte, ils produisent une petite quantité de chaleur, comme tout courant circulant dans un conducteur électrique. En ce sens, l'expérience démontre le principe de conservation de l'énergie.

La démonstration pourrait être améliorée en plaçant une série d'interrupteurs à lames souples, associés à des résistances, le long du tube, comme dans la jauge à carburant décrite précédemment. En reliant les résistances entre les broches de décharge et de seuil d'un temporisateur 555, fonctionnant en mode astable à une fréquence audible, la bille, en descendant, créerait une série de tonalités de plus en plus aiguës en passant devant les interrupteurs.

Cette démonstration peut également être réalisée avec un tube en aluminium en forme de « U » ou de gouttière, bien que la bille ne soit pas autant ralentie.

Attention: dangers des aimants

Il serait irresponsable de ma part de ne pas évoquer les dangers. Vous pensez peut-être qu'il est difficile de croire qu'un aimant puisse vous blesser, mais un aimant

au néodyme en est capable, comme j'en ai fait moi-même l'expérience malheureuse. Un aimant cylindrique en néodyme N52, ne mesurant que 20 mm de diamètre et 20 mm de long, peut porter un poids d'environ 20 kg, soit 20 litres d'eau. Si vous avez deux aimants de ce type dont les pôles opposés sont en regard, cette force est doublée. S'ils s'attirent et qu'un de vos doigts est dans leur passage, cela se terminera avec un pansement.

Vous courez un risque différent si vous tentez ensuite de séparer les deux aimants. Vous pouvez être sûr de vous casser un ongle et surtout d'être exaspéré par cette situation. Vous pouvez consulter de nombreuses séquences filmées sur YouTube, montrant comment manipuler des aimants puissants.

Le néodyme est brillant, et les aimants sont souvent revêtus d'une couche de nickel. Ils peuvent se briser accidentellement en petits morceaux, lors d'un impact résultant de leur attraction magnétique. Les brisures de métal sont très acérées et peuvent voler à vitesse élevée. Vous devez absolument porter une protection oculaire si vous manipulez des aimants de forte puissance.

Cela devrait être évident (je le mentionne tout de même), mais vous devez maintenir les aimants éloignés des disques durs et autres moyens de stockage magnétique, sans oublier les cartes de crédit. En fait, les aimants doivent être entreposés loin de tout appareil électronique.

Pour terminer, un pacemaker peut être perturbé par un champ magnétique important. Manipulez les aimants puissants en respectant les précautions appropriées.

Les capteurs masqués

Expérience

30

Les capteurs à effet Hall nous entourent. Lorsque vous abaissez l'écran de votre ordinateur portable pour le fermer, un capteur à effet Hall, placé sous le capot du boîtier, détecte l'action et provoque la mise en veille de l'ordinateur.

Lorsque vous mettez en marche votre appareil photo compact, un capteur à effet Hall s'assure que l'objectif est totalement sorti. Des dispositifs à effet Hall contrôlent la rotation du moteur de votre disque dur et régule sa vitesse. Ils sont également présents dans les allumages électroniques de votre voiture, dans les serrures des portes, afin d'allumer l'éclairage intérieur quand vous tournez votre clé. Votre machine à laver récente utilise sans doute des capteurs à effet Hall pour vérifier que son hublot est fermé, de même dans votre four à micro-ondes.

Chaque capteur génère un faible courant électrique en réponse à la présence d'un champ magnétique. Il peut être utilisé comme un interrupteur Reed, mais il est totalement solide. Son principe de fonctionnement a été découvert en 1879, mais son effet était tellement faible que son utilisation dans de multiples applications n'a pu être effective qu'après l'apparition des circuits intégrés amplificateurs utilisés conjointement avec ces capteurs.

Ces capteurs ont pour avantage leur très faible coût, leur fiabilité et leur miniaturisation, et contrairement aux interrupteurs à lames souples, ils peuvent se présenter sous forme de minuscules composants montés en surface. Ils ont un temps de réponse très rapide et sont difficiles à endommager. Il en existe quatre types, permettant d'adapter leurs comportements à vos applications. Leur intégration aux circuits est moins simple, mais ils restent néanmoins une excellente alternative aux interrupteurs magnétiques à lames souples.

Une sélection de capteurs à effet Hall est présentée sur la fig. 30-1.



Figure 30-1. Vue de quelques capteurs à effet Hall.

Test d'un capteur à effet Hall

Ce test met en œuvre le plus courant et le moins coûteux des capteurs à effet Hall, qui est de type bipolaire, c'est-à-dire qu'un pôle magnétique l'active, tandis que le pôle opposé le désactive. (Dans ce fonctionnement, le terme bipolaire n'a aucun lien avec les transistors bipolaires.) Un capteur bipolaire est également appelé à verrouillage car il demeure à un état donné jusqu'à ce qu'il soit forcé vers l'autre état.

Une version simplifiée du capteur ATS177 produit par Diodes Incorporated est présentée sur la fig. 30-2 page suivante. La plupart des capteurs à effet Hall ont le même brochage. Le code situé sous la référence du composant indique, en général, la date de fabrication ce qui nous est d'aucune utilité ici.

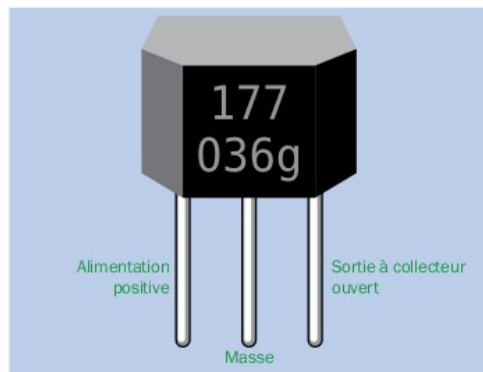


Figure 30-2. Brochage et rôle des connexions d'un capteur à effet Hall bipolaire AT5177, produit par Diodes Incorporated. Les autres capteurs à effet Hall ont en général le même brochage.

Dans les fiches techniques, la broche d'alimentation est en général identifiée par V_{cc} ou V_{dd} (ce qui signifie la même chose en ce cas). La masse est pratiquement toujours définie par Gnd. La sortie est souvent nommée Out, mais, dans le cas des capteurs prévus pour être reliés à des circuits intégrés logiques, cela peut être DO, signifiant *Digital Output*.

Le fonctionnement d'un capteur est facilement vérifiable à l'aide d'un petit barreau magnétique identique à celui que vous avez utilisé pour tester l'interrupteur Reed dans l'expérience 28. Mais contrairement à un interrupteur magnétique, un capteur à effet Hall est conçu pour être activé lorsque l'un des pôles de l'aimant est plus proche du capteur que l'autre.

Assemblez le circuit de la fig. 30-3. Remarquez que le capteur a une sortie à collecteur ouvert, comme un phototransistor, un microphone électret ou un comparateur, que vous avez rencontrés précédemment. Si vous avez besoin de vous remémorer le fonctionnement, consultez la section « La sortie » de l'expérience 6, page 41.

Je suggère une alimentation de 9 V DC, vous pouvez donc utiliser une pile de 9 V. L'alimentation n'a pas besoin d'être régulée, le capteur n'étant pas un circuit digital. La plupart des capteurs à effet Hall peuvent utiliser une alimentation allant jusqu'à 20 V DC, sans problème, mais certains sont conçus pour des tensions plus faibles. Vérifiez toujours les fiches techniques pour en être sûr.

Appliquez l'aimant comme suggéré sur la fig. 30-4. Les pôles d'un aimant n'étant en général pas identifiés, vous devrez procéder par essais successifs pour déterminer quelle extrémité de l'aimant active le capteur. Quand la LED est allumée, utilisez l'autre extrémité de l'aimant pour l'éteindre.

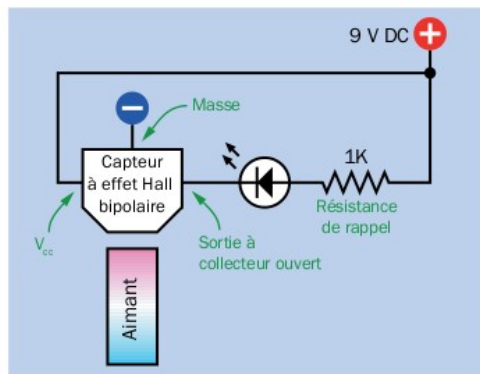


Figure 30-3. Schéma très simple permettant de vérifier le fonctionnement d'un capteur à effet Hall.

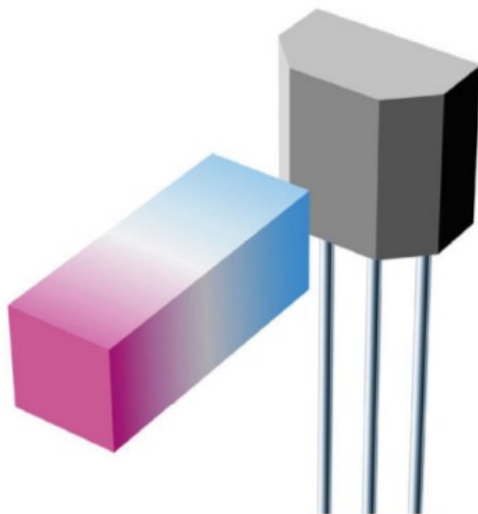


Figure 30-4. Approchez un pôle de l'aimant près de la partie biseautée du capteur bipolaire, en gardant l'autre pôle éloigné. Inversez l'orientation de l'aimant pour basculer le capteur à l'état opposé.

La diode LED devrait s'allumer puis s'éteindre franchement, sans diminution d'intensité ni clignotement. Ceci est dû au circuit interne du capteur, connu sous le nom de bascule de Schmitt, parfois appelée trigger de Schmitt.

Normalement, un capteur à effet Hall peut absorber une intensité maximale de 20 mA. En utilisant une résistance de rappel de 1K et une alimentation de 9 V DC, vous devriez constater que le capteur absorbe environ la moitié de cette intensité. Vérifiez cela avec votre multimètre. Une LED prévue pour 20 mA ne brille pas intensément quand elle est traversée par une intensité de 10 mA, c'est néanmoins suffisant pour vous assurer qu'elle s'allume et s'éteint franchement.

Applications

Vous pensez peut-être qu'un capteur à effet Hall bipolaire est moins pratique qu'un interrupteur Reed, non seulement du fait qu'il requiert une alimentation, mais surtout car il utilise un pôle d'un aimant puis l'autre pour être activé et désactivé. Un capteur est, cependant, conçu pour fonctionner correctement quand une série de pôles passent devant lui, ou au contraire, s'il se déplace devant une série de pôles magnétiques.

Les impulsions générées par le capteur peuvent être utilisées en retour pour contrôler précisément la vitesse d'un moteur. La vue simplifiée d'une roue à dents magnétisées à polarisation alternée sur la fig. 30-5 illustre parfaitement ce concept.

Dans votre montage de test, essayez de tourner l'aimant de 90 degrés et déplacez-le devant le capteur, de façon à ce qu'il réagisse à un pôle, puis à l'autre. Vous devriez à nouveau constater que la LED s'éteint, puis s'allume de façon franche et qu'il existe une hystérésis, le capteur tendant à « coller » à son état activé ou désactivé.

L'hystérésis peut être représentée comme sur la fig. 30-6. Comparez cette représentation avec celle de la fig. 6-8, qui illustre le comportement d'un comparateur. La différence vient du fait que le comparateur réagit à une variation de tension, alors que le capteur à effet Hall réagit en fonction de la variation du champ magnétique.

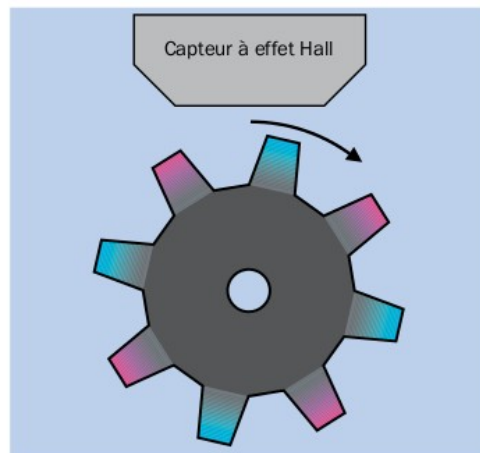


Figure 30-5. Capteur à effet Hall mesurant la vitesse de rotation d'une roue à dents magnétiques à pôles alternés.

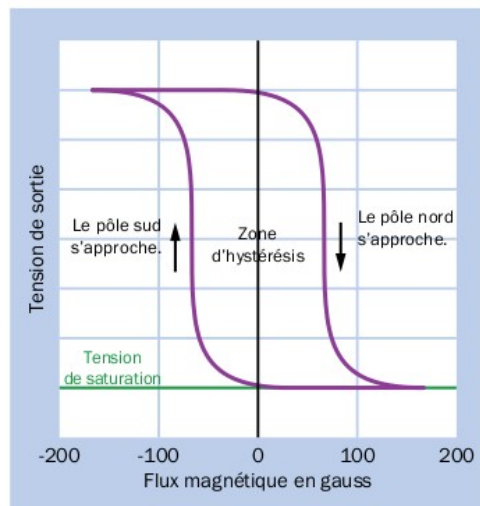


Figure 30-6. Hystérésis d'un capteur bipolaire à effet Hall.

Vous pourriez réaliser un compteur kilométrique ou un indicateur de vitesse pour une bicyclette, en attachant un aimant entre deux rayons d'une roue. La sortie du capteur serait reliée à un microcontrôleur qui convertirait chaque tour de roue en une distance. Le microcon-

trôleur pourrait alors calculer la vitesse en divisant cette distance par le temps.

En bref: les capteurs à effet Hall

- Les versions à fils des capteurs à effet Hall sont habituellement scellées dans un petit boîtier en plastique noir, d'environ $2,5 \times 2,5 \times 1,25$ mm, et possèdent trois fils. Ils ressemblent à un transistor en boîtier TO92, mais en plus petit.
- Quand une fiche technique fait référence à la face ou au sommet d'un capteur à effet Hall, cela signifie l'endroit où est imprimée sa référence. Cette face est biseautée alors que le dos du capteur ne l'est pas. Les capteurs sont normalement prévus pour réagir à un pôle magnétique approché de sa face biseautée.
- La référence d'un capteur à effet Hall est habituellement abrégée à trois chiffres. Un code supplémentaire sous ces trois chiffres indique la date de fabrication du capteur.
- La tension d'alimentation varie souvent entre 3 V DC et 20 V DC, autorisant son utilisation avec une pile de 9 V. Attention, cependant, certains capteurs ne tolèrent qu'une tension d'alimentation de 3 V DC à 5 V DC. Vérifiez bien les fiches techniques.
- Tout comme un phototransistor, un capteur à effet Hall est souvent encapsulé avec un transistor NPN ayant sa sortie à collecteur ouvert. Le courant maximal qui peut traverser cette sortie peut varier entre 20 mA et 25 mA.
- Lorsqu'une résistance de rappel est placée entre la sortie à collecteur ouvert du capteur et le pôle positif de l'alimentation, comme sur la fig. 30-3, la sortie sera basse quand le capteur est activé et haute quand il est désactivé.
- De nombreux capteurs à effet Hall incorporent également une bascule de Schmitt, prévue pour assurer une transition franche entre les deux états du capteur, avec un effet d'hystérésis.
- Différents types de capteurs à effet Hall peuvent être activés, soit par un pôle nord, soit par un pôle sud. Leurs fiches techniques devraient le préciser.
- Les capteurs à effet Hall ne génèrent pas de rebonds, ce qui est un problème avec les interrup-

teurs à lames souples. Cela les rend très utiles pour fournir une entrée à une porte logique.

Types de capteurs

Il existe quatre types courants de capteurs à effet Hall.

- Le type *bipolaire* qui vient d'être décrit. Il nécessite un champ magnétique de polarité opposée pour être activé et désactivé.
- Le type *unipolaire* qui sera activé à l'approche d'un pôle magnétique et désactivé lorsque l'aimant est éloigné. Il ne nécessite pas de pôle opposé pour être désactivé.

Les capteurs unipolaires sont disponibles dans des versions prévues pour être activées soit par le pôle nord d'un aimant, soit par son pôle sud. Tout comme le type bipolaire, il peut intégrer une bascule de Schmitt pour fournir une transition franche.

Rappelez-vous que la sortie d'un capteur désactivé présente une résistance de sortie élevée par rapport à la masse, permettant d'obtenir un niveau haut au travers d'une résistance de rappel. Quand le capteur est activé, la tension de sortie est au niveau bas. C'est exactement le même comportement que celui d'un phototransistor.

- Un capteur à effet Hall dit *linéaire* ne contient pas de bascule de Schmitt. Il génère une tension (amplifiée par son transistor interne) variant proportionnellement avec l'intensité du champ magnétique externe. En l'absence d'un champ magnétique, la tension de sortie est égale à la moitié de la tension d'alimentation. En réaction à un pôle magnétique, la tension de sortie du capteur diminue jusqu'à presque 0 V DC. En réaction à l'autre pôle, la tension augmente jusqu'à sa limite, proche de la valeur de la tension d'alimentation.

Les capteurs à effet Hall linéaires sont également appelés capteurs analogiques. Leur broche de sortie est généralement reliée à l'émetteur du transistor NPN interne plutôt qu'à son collecteur. Une résistance de valeur minimale 2K2 doit être reliée entre sa sortie et la masse, afin de limiter l'intensité fournie.

La sortie variable peut être interprétée pour mesurer la distance entre un aimant et le capteur.

La valeur perçue de l'intensité du champ magnétique diminue avec la distance, de ce fait, le capteur ne réagit plus quand la distance est trop importante (plus de 10 mm dans la plupart des cas).

- Le capteur à effet Hall *omnipolaire* ressemble à un interrupteur Reed. Il est activé par un champ magnétique de n'importe quelle polarité magnétique et désactivé en l'absence de tout champ magnétique. Ce capteur comporte en fait deux capteurs à effet Hall et un circuit logique qui réagit à la différence de tension générée par ces capteurs. Du fait de la présence d'un circuit additionnel, et de la plus faible demande pour ce type de capteurs, leur prix a tendance à être plus élevé.

Idées d'utilisation

Un capteur à effet Hall peut facilement être interfacé avec des circuits logiques. Une résistance de rappel de 10K peut être utilisée comme sur la fig. 30-7. Une valeur plus élevée de cette résistance est acceptable, car les entrées des circuits logiques ont, comparativement, une impédance beaucoup plus élevée et nécessitent un très faible courant. La tension devra bien entendu être vérifiée afin de s'assurer qu'elle est située dans les limites appropriées.

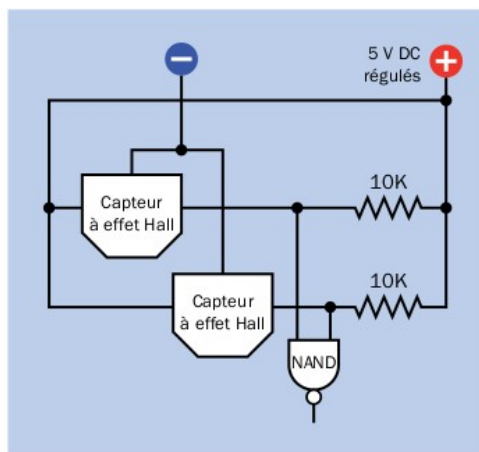


Figure 30-7. La porte NAND dans ce circuit aura une sortie normalement basse qui deviendra haute uniquement quand l'un des capteurs ou les deux seront activés.

Dans ce circuit, la porte NAND délivre une sortie au niveau haut quand l'un ou les deux capteurs sont activés. Rappelez-vous que la tension de sortie à collecteur ouvert d'un capteur à effet Hall est basse quand ce dernier est activé, et par ailleurs qu'une porte NAND a sa sortie basse quand ses deux entrées sont au niveau haut, et haute quand une ou ses deux sorties sont au niveau bas.

Les capteurs unipolaires sont appropriés pour cet usage.

Si un capteur à effet Hall est utilisé pour réagir à l'approche d'un aimant tenu manuellement, et dont la polarité n'est pas connue, le type *omnipolaire* conviendra.

Un capteur bipolaire réagit comme un capteur unipolaire si un aimant polarisateur est placé à ses côtés. En d'autres termes, si un capteur est normalement activé par le pôle nord d'un aimant lui faisant face et désactivé par un pôle magnétique sud lui faisant face, un petit aimant peut être placé à côté afin de s'assurer de la désactivation du capteur. Lorsque le pôle nord d'un aimant est placé en face du capteur, son champ magnétique prend alors le dessus sur le champ magnétique plus faible du petit aimant et active le capteur.

Quand des aimants sont utilisés de cette façon, ils doivent présenter une forte coercivité, c'est-à-dire être capables de résister à la contrainte du changement de leur polarité. Le premier aimant doit en effet résister et ne pas être remagnétisé en polarité inverse par l'autre aimant. Pour ce type d'application, on préfère les aimants au néodyme, qui ont une grande coercivité.

Pour aller plus loin : jeu de lancer de billes miniature

Dans les kermesses ou les fêtes traditionnelles, vous avez probablement rencontré différentes versions du jeu de lancer de boules. Vous êtes assis en bas d'une piste inclinée percée de plusieurs trous à l'autre extrémité. Votre objectif est de faire rouler des boules depuis le bas de la piste et de les faire entrer dans un trou, le plus rapidement possible, sachant que les trous les plus éloignés rapportent davantage de points.

Si la boule évite tous les trous, elle disparaît dans une gouttière, en haut de la piste et ne marque aucun point. Une représentation simplifiée du jeu est illustrée sur la fig. 30-8 page suivante.

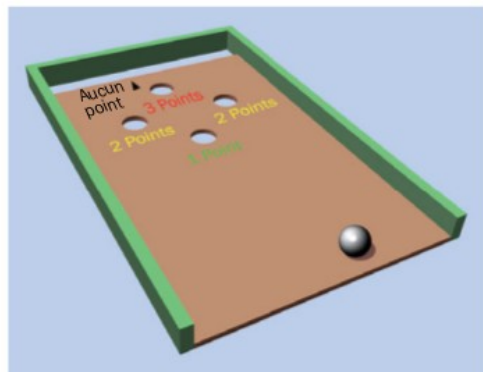


Figure 30-8. Jeu de boules traditionnel des kermesses.

En général, les joueurs concourent sur des pistes adjacentes, et la personne qui atteint le score le plus élevé en premier reçoit un prix. Vous pouvez réaliser une version miniature de ce jeu, utilisant des billes magnétiques et des capteurs à effet Hall omnipolaires. Si vous créez une version à joueur unique, vous n'aurez besoin que d'un limiteur de temps et d'un compteur de score.

Comment pourriez-vous ajouter un, deux ou trois points de score ? Selon moi, la façon la plus simple consiste à disposer plusieurs capteurs le long des chemins de retour de la balle depuis les trous. La balle activera les capteurs en passant devant.

Pour cela, vous pouvez construire des gouttières en bois, mais je pense qu'il serait plus facile d'utiliser un tube souple en plastique.

Pliage du plastique

Les tubes en polyéthylène PET (polyéthylène téréphthalate) s'acquièrent facilement et sont économiques. Un tel tube permet de garder sous contrôle les billes durant leur retour, même si quelqu'un secoue ou bouscule le jeu. Le seul problème est de plier le tube sans qu'il subisse d'étranglement ; la seule façon d'y parvenir est d'utiliser un pistolet à air chaud après avoir inséré un ressort à l'intérieur du tube.

Je m'éloigne ici de la réalisation de montages électroniques, mais maintenant que j'utilise les capteurs, il faut également penser à la manière selon laquelle ils peuvent s'intégrer dans le milieu physique.

La fig. 30-9 montre un morceau de tube PET en cours de pliage, dans lequel un ressort a été inséré. L'étape suivante sera d'extraire le ressort, ce qui pourrait s'avérer difficile. Il vous sera peut-être nécessaire de faire tourner le ressort afin de diminuer légèrement son diamètre.



Figure 30-9. Morceau de tube de polyéthylène courbé régulièrement à l'aide d'un pistolet à air chaud, après avoir inséré un ressort à l'intérieur.

Des tubes de plus petites dimensions peuvent être ainsi pliés. En ce qui concerne le jeu de billes, utilisez des billes de 10 mm de diamètre et du tube de diamètre 12,5 mm et de 1,5 mm d'épaisseur. Vous devriez trouver facilement de tels tubes et le ressort correspondant dans les magasins de bricolage ou, pour le tube uniquement, dans les fournitures pour aquariums.

Vous pouvez, bien entendu, préférer le construire en bois ou réaliser des projets nécessitant moins de travail en atelier que celui-ci. Je sais que tout le monde ne partage pas mes passions étranges, comme le pliage de tubes en plastique à l'intérieur desquels je fais circuler

des billes. Au point où j'en suis, je vais tout de même terminer la description de ce projet.

Le circuit électronique

Placez un capteur dans le tube de retour du trou à un point, deux capteurs dans ceux des trous valant deux points et trois capteurs pour le tube du trou valant trois points. Cela fait huit capteurs au total. Reliez alors ces capteurs à un compteur par l'intermédiaire d'une porte NAND à huit entrées, comme le montre la fig. 30-10, les tubes de retour pouvant être installés sous la piste du jeu.

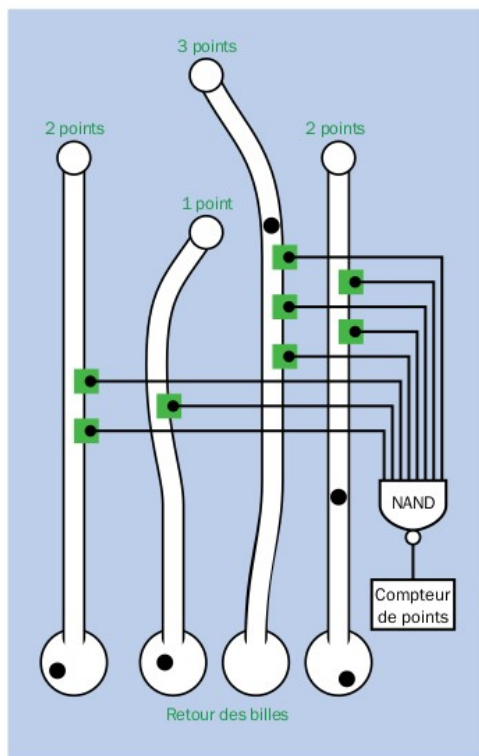


Figure 30-10. Capteurs à effet Hall (représentés par des carrés verts), utilisés pour compter les points du jeu de lancer des billes.

Si vous vous reportez à la fig. 30-7, vous vous rappellerez qu'une porte NAND est parfaitement appropriée pour utiliser des capteurs à effet Hall, car sa sortie passe au niveau haut chaque fois qu'un capteur passe au niveau bas.

Les capteurs omnipolaires conviendront à cette application, car ils réagiront au passage de la bille, quelle que soit la polarité du champ magnétique créé. Ces capteurs devraient en toute logique générer un signal propre, raison pour laquelle on les a choisis au détriment des interrupteurs Reed. Il n'y a aucun intérêt à éliminer les rebonds d'un interrupteur à lames souples (en utilisant les principes étudiés dans *L'Électronique en pratique*), si l'on peut utiliser un capteur sans rebond.

La sortie de la porte NAND peut être reliée à un compteur décimal 4026B. Ce circuit intégré est spécifiquement conçu pour piloter un afficheur numérique à sept segments LED. La retenue de ce circuit sera reliée à un second 4026B pour pouvoir comptabiliser un maximum de 99 points. Le 4026B est un autre composant décrit dans *L'Électronique en pratique*, (utilisé dans un testeur de réflexes).

Ajoutez un interrupteur de réinitialisation qui remet le score à zéro et déclenche une impulsion de 30 secondes générée par un timer 555, qui arrête le compteur à la fin de son cycle. C'est tout ! Vous venez de réaliser votre propre jeu d'arcade, ressemblant aux premiers flippers, avec des billes magnétiques.

Réfléchissez, pourriez-vous construire un jeu de flippers complet à l'aide de billes en néodyme ? Peut-être, mais sans parler de la complexité, vous devrez vous assurer que les billes n'entrent jamais en contact les unes avec les autres. Dans le jeu de lancer des billes, détacher les billes réunies par accident ne fera qu'accroître la tension alors que vous tentez de battre le score le plus élevé.

Il existe deux catégories de capteurs sensibles à la lumière. Les capteurs actifs et les capteurs passifs.

L'interrupteur chronophotonique qui était l'objet de l'expérience 7, utilisait un phototransistor qui est un capteur passif. Il est en permanence en attente d'un flux lumineux extérieur qui change sa résistance interne effective, selon l'intensité lumineuse.

Le détecteur de mouvement à infrarouge (PIR) est un autre capteur passif, d'ailleurs le P de son acronyme équivaut à passif (*passive* en anglais), et IR signifie infrarouge. Ces capteurs sont fréquemment utilisés pour allumer des éclairages ou déclencher des systèmes d'alarme quand ils détectent la chaleur de quelqu'un se trouvant à proximité.

Les détecteurs PIR sont très utiles, mais les modèles que l'on trouve dans les magasins de bricolage ne permettent pas de réaliser facilement des expériences. Si vous souhaitez vous familiariser avec ces types de capteurs, il serait préférable d'en acheter un monté sur un petit circuit imprimé d'évaluation, comme celui de la fig. 31-1. Des fournisseurs de matériel électronique pour les loisirs les vendent pour quelques euros, ils sont prévus pour être reliés directement aux microcontrôleurs. Vous trouverez d'excellents tutoriaux en ligne expliquant comment les utiliser. Pour ma part, je ne les traiterai pas dans cet ouvrage, car je pense que les capteurs actifs offrent des possibilités d'utilisation plus intéressantes.

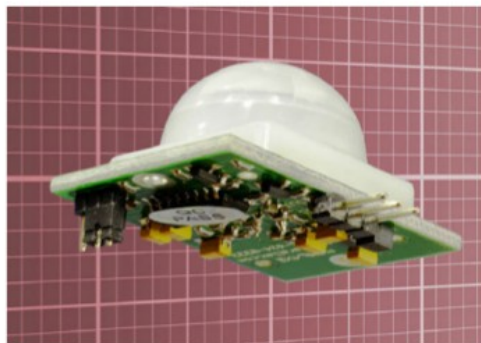


Figure 31-1. Capteur infrarouge passif (PIR) monté sur un circuit imprimé d'évaluation facilitant son expérimentation.

Les capteurs de lumière actifs

Au lieu d'être simplement en attente de la réception d'un flux lumineux ambiant, un capteur de lumière actif émet de la lumière, presque toujours infrarouge, bien qu'il existe quelques capteurs dans le domaine de l'ultra-violet. Des capteurs actifs repèrent les bourrages papier dans les photocopieurs ; en automatisation industrielle, ils détectent la progression des produits tout au long du processus de fabrication ; ou en robotique, ils vérifient la position des pièces mobiles.

Habituellement, le flux lumineux est émis par une diode LED infrarouge dans une bande de fréquences très étroite et pouvant être modulée, afin de la différencier des autres sources lumineuses. Un circuit proche du détecteur (qui est généralement un phototransistor) est réglé sur la même fréquence.

La combinaison d'un émetteur de lumière avec un capteur de lumière est appelée émetteur-récepteur, il en existe deux variantes.

1. L'émetteur-récepteur réfléchitif

- La LED et le phototransistor sont montés côte à côte, pointant dans la même direction. La fig. 31-2 en montre un exemple.

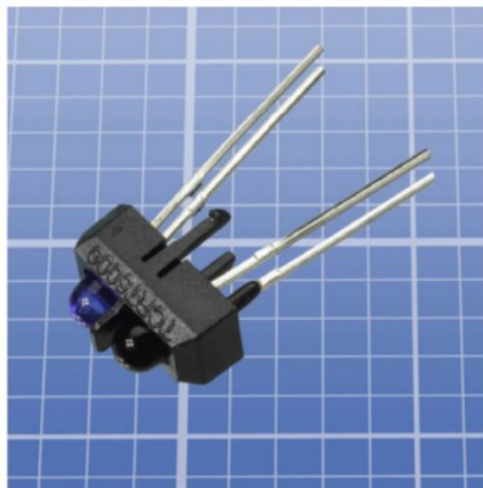


Figure 31-2. Cet émetteur-récepteur réfléchitif est constitué d'un phototransistor infrarouge placé à côté d'un émetteur infrarouge. La lumière émise par l'émetteur se réfléchit sur un objet placé à faible distance et le phototransistor enregistre les variations dues au mouvement de l'objet ou à l'interruption du faisceau.

- Une surface réfléchissante, telle qu'un morceau de mylar argenté ou un objet blanc, doit être utilisée afin de renvoyer la lumière émise par la LED vers le phototransistor.
- La distance de détection est généralement très limitée. De nombreux capteurs réfléchitifs réagissent à la présence d'une surface réfléchissante à environ 12 mm de distance. Il y a des exceptions à cette règle, mais pour un coût plus important.

2. L'émetteur-récepteur transmissif

- La LED et le phototransistor sont placés de part et d'autre de la fente d'un support en forme de U, comme illustré sur la fig. 31-3.

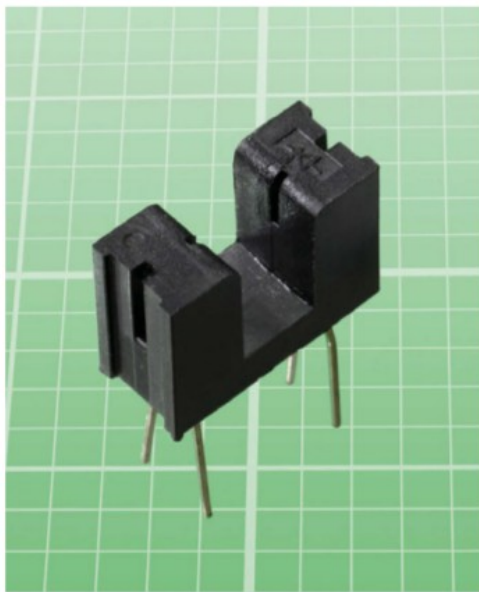


Figure 31-3. Dans ce capteur transmissif Everlight ITR9606-F, le flux lumineux traverse la fente pour atteindre le phototransistor qui lui fait face. Le symbole de schématique d'une diode est gravé sur un des deux côtés du composant, pour indiquer l'emplacement de la diode LED.

- Si un objet interrompt le faisceau lumineux, le phototransistor modifie sa sortie.
- Dans de nombreux composants de ce type, la largeur de la fente est d'environ 5 à 6 mm.
- Un émetteur-récepteur transmissif est moins universel qu'un type réfléchitif mais son installation est très facile.
- Ce type de capteur est parfois appelé interrupteur optique.

Dans la prochaine expérience, je vous expliquerai comment utiliser un capteur transmissif comme l'Everlight ITR9606-F. Après l'avoir testé, je vous suggérerai quelques applications. Mais d'abord...

Attention : mort lente des capteurs !

Les capteurs actifs sont toujours en fonctionnement. Tant que le système est sous tension, la diode LED infrarouge émet de la lumière.

Ceci implique une consommation d'énergie électrique (généralement de l'ordre de 10 à 20 mA), mais ce n'est pas le principal problème. Le plus ennuyeux, c'est la tendance des LED infrarouges à se dégrader au fur et à mesure de leur utilisation. Certaines fiches techniques vous informent que la quantité de lumière émise diminue d'environ 50 % au bout de cinq ans. D'autres fiches n'en font pas état, c'est pourtant ce qui arrivera. La diminution serait due à l'échauffement ou aux procédés chimiques utilisés lors de la fabrication. D'après ce que j'ai pu lire à ce sujet, les causes de cette dégradation ne sont pas exactement connues, mais chacun s'accorde à admettre qu'elle existe.

Si vous utilisez un capteur infrarouge actif, prévoyez si possible une grande marge d'erreur dans votre circuit afin qu'il puisse continuer à fonctionner le plus longtemps possible, malgré la diminution de luminosité de la LED au cours du temps. Essayez également de diminuer l'intensité qui traverse la LED.

Quelques chiffres

L'émetteur infrarouge d'un capteur transmissif est une LED qui nécessite une tension directe relativement faible, de l'ordre de 1,2 V, pas plus élevée que 1,5 V. Placez une résistance externe en série avec la LED de façon à la protéger, car aucune résistance n'est incorporée au capteur. La valeur de la résistance sera déterminée en fonction de la tension d'alimentation de votre circuit.

Vérifiez l'intensité absorbée par la LED ainsi que sa tension de fonctionnement. Ajustez la valeur de la résistance, de façon à ce que l'intensité soit proche de la valeur typique de la fiche technique. Vous n'avez pas besoin (et ce n'est pas souhaitable) d'avoir un courant proche de la valeur maximale absolue.

Le récepteur infrarouge est généralement un phototransistor ayant une sortie à collecteur ouvert, exactement comme le capteur à effet Hall. Comme précédemment, utilisez une résistance de rappel. La seule question qui se pose est relative à la valeur de la résistance de rappel la plus appropriée. La fiche technique ne précise que l'intensité maximale pouvant être absorbée par le collecteur ouvert. La valeur maximale atteint environ 20 mA alors que la valeur typique serait beaucoup plus faible. En conséquence, il est hors de question de piloter directement une LED avec ce type de capteur.

Test d'un capteur infrarouge

Maintenant que vous avez découvert ce capteur, voyons comment le tester ! Si vous utilisez le capteur ITR9606-F, le brochage est présenté sur la fig. 31-4. Mais connaissez-vous la bonne orientation du capteur ? Le capteur Everlight ITR9606-F vous facilite la tâche car le symbole d'une diode est gravé sur son boîtier, visible sur la fig. 31-3, si vous y prêtez attention. De nombreux autres capteurs ont des indications comparables et leurs fiches techniques permettent de repérer leurs connexions. Certains sont identiques au capteur ITR9606-F, d'autres ont des fils de connexions inversés.

L'expérience réalisée ici devrait fonctionner avec n'importe quel capteur optique transmissif, à condition de procéder avec méthode, en repérant d'abord le brochage correct et en évitant de faire circuler un courant trop important à travers le composant.

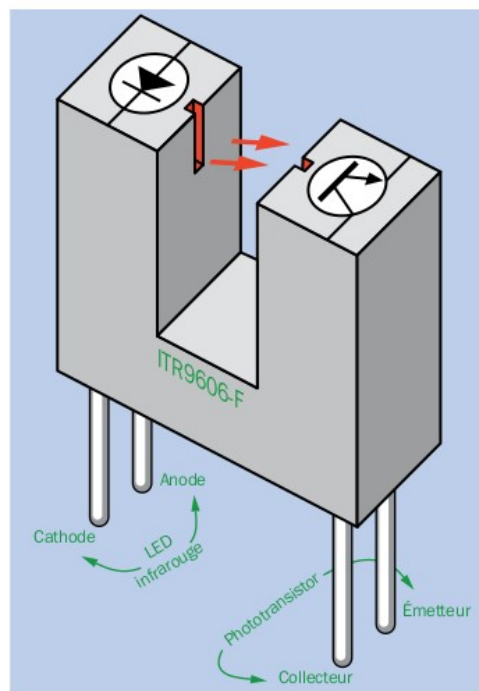


Figure 31-4. Brochage et rôle des connexions du capteur Everlight ITR9606-F. D'autres capteurs avec les mêmes caractéristiques peuvent avoir le même brochage, ou une inversion de deux broches. Vérifiez leur fiche technique pour plus de détails.

Sur la fig. 31-5, je suggère de tester le capteur en utilisant un circuit intégré quadruple OR à deux entrées. Les raisons de ce choix vont vous paraître claires au fur et à mesure des explications. Une vue du montage de ce circuit est représentée sur la fig. 31-6.

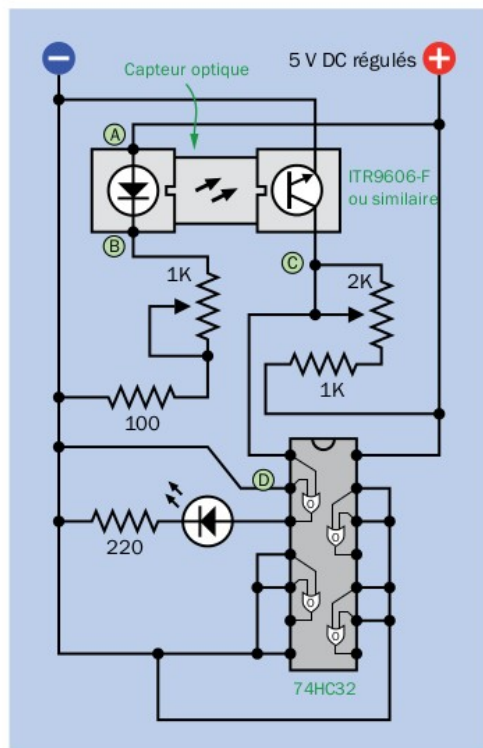


Figure 31-5. Schéma de test d'un capteur optique transmissif, utilisant une porte OR.

Remarquez que j'utilise une alimentation régulée de 5 V DC, en raison de l'emploi du circuit intégré logique.

Quand vous réaliserez le circuit, laissez dans un premier temps l'alimentation du circuit non reliée ainsi que la sortie du phototransistor. La première étape du test nécessite de n'alimenter que la diode LED.

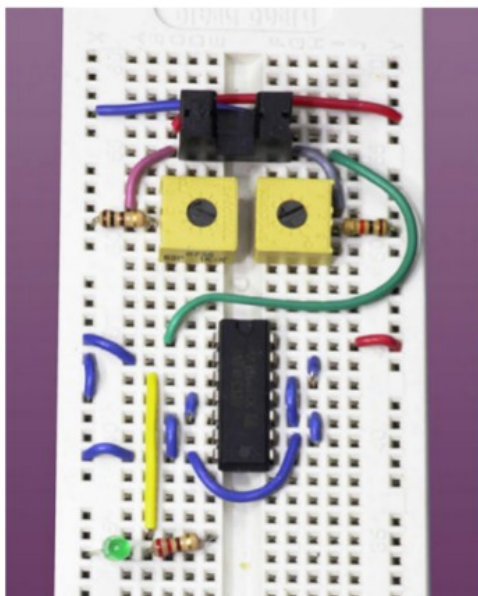


Figure 31-6. Version montée du circuit de test d'un capteur optique transmissif. Le capteur en forme de U est en haut, juste au-dessus des potentiomètres de réglage.

Test de la LED infrarouge

Rappelez-vous que vous ne verrez aucune lumière émise par la LED intégrée au capteur, car elle émet dans le spectre invisible. Vous devrez donc vous fier à votre multimètre pour savoir si elle fonctionne.

Réglez le potentiomètre de 1 K de la fig. 31-5 à sa valeur maximale. (Mesurez-le avec votre multimètre avant de le placer sur la platine de montage, si vous avez un doute). Mesurez ensuite la tension entre les points A et B. Elle devrait se situer entre 1 V DC et 1,2 V DC.

Vous devez également évaluer le courant qui traverse la LED. Retirez le fil qui relie le point A au pôle positif de l'alimentation. Réglez votre multimètre pour la mesure d'intensité en mA et reliez le point A à l'alimentation par l'intermédiaire de votre multimètre. En modifiant le réglage du potentiomètre, vous devriez voir l'affichage du multimètre changer. Réglez le potentiomètre afin d'obtenir un courant d'environ 10 mA. La LED supporte davantage, mais en raison d'une application future que

J'ai en tête, je ne souhaite pas que ce circuit absorbe trop de puissance.

Retirez le potentiomètre et mesurez sa valeur entre le curseur et la broche du haut. Dans mon cas, j'obtiens une valeur d'environ $350\ \Omega$. Ainsi, la résistance en série avec la LED infrarouge est d'environ $100\ \Omega + 350\ \Omega = 450\ \Omega$, ce qui est relativement élevé pour une diode LED alimentée en 5 V DC, mais mon circuit fonctionne avec cette valeur.

Vous pouvez maintenant retirer le potentiomètre ajustable de 1K et la résistance de $100\ \Omega$ et les remplacer par une résistance de $450\ \Omega$, ou de la valeur qui vous permettait d'obtenir une intensité de 10 mA.

Test du phototransistor

Maintenant que nous avons terminé avec la diode LED, reliez le collecteur du phototransistor et mesurez la tension entre le point C et la masse. Cette tension est fournie par la résistance de 1K et le potentiomètre ajustable de 2K qui constituent la résistance de rappel de la sortie à collecteur ouvert.

Pendant que vous mesurez cette tension, insérez un petit morceau de carton dans la fente du capteur afin de bloquer le passage du rayon infrarouge, puis retirez-le. En réglant le potentiomètre, vous devriez obtenir une tension maximale supérieure à 4,5 V DC quand le carton est retiré, et une tension d'environ 0,5 V DC en sa présence. Je parie qu'une résistance totale d'environ 2K conviendra.

Retirez maintenant le potentiomètre de 2K et la résistance de 1K et remplacez-les par une résistance de rappel permettant d'obtenir la valeur de la tension souhaitée au point C du circuit.

Test logique

La famille des circuits intégrés 74HC00 acceptant un niveau haut d'entrée supérieur à 3,5 V DC et un niveau bas inférieur à 1 V DC, la sortie du capteur devrait convenir.

Une résistance de rappel du phototransistor d'environ $100\ \Omega$ est recommandée pour certains capteurs transmissifs. Si vous utilisez l'un d'entre eux, vérifiez la valeur du courant absorbé par le capteur. Pour cela, réglez

votre multimètre pour la mesure de milliampères, déconnectez l'émetteur du transistor du circuit et insérez le multimètre entre l'émetteur et la masse. Vous ne devriez pas dépasser 4 mA.

Reliez maintenant le point C à la porte OR en haut et à gauche du circuit intégré comme indiqué. L'autre entrée de cette porte, au point D, est reliée à la masse pour l'instant.

En déplaçant le morceau de carton à l'intérieur du capteur, vous devriez observer la LED s'allumer sans hésitation ni clignotement.

L'impédance d'entrée des circuits intégrés de la famille du 74HC00 étant très élevée, vous ne devriez pas constater de baisse notable de la tension de la sortie du transistor à collecteur ouvert.

Pour ce test, essayez différents types d'objets pour cacher la lumière émise par la LED infrarouge du capteur. Vous devriez remarquer qu'un morceau de carton épais permet de générer un niveau de sortie plus élevé qu'un morceau de papier. Rappelez-vous de cette constatation si vous choisissez un de ces capteurs pour une application pratique.

Variantes

Vous pourriez approfondir cette expérience en ajoutant un autre capteur optique. Déconnectez le fil de la seconde entrée de la porte OR au point D de la masse, et reliez cette entrée à la sortie d'un second capteur. Vous devriez maintenant obtenir un niveau haut à la sortie de la porte OR en bloquant la lumière de l'un des capteurs. Vous pouvez naturellement utiliser une porte OR avec plus d'entrées, si vous souhaitez vérifier qu'au moins un des capteurs d'un ensemble est activé.

Vous pourriez également remplacer la porte OR par une porte XOR. En ce cas, vous n'aurez un résultat que si un seul capteur est activé. Les portes logiques vous permettent de personnaliser le comportement de votre circuit selon vos besoins.

Dans un contexte différent, un capteur optique transmissif peut également piloter un comparateur, de la même manière que pour l'interrupteur chronophotographique, dans lequel nous avions utilisé un phototransistor et un comparateur (voir expérience 7). Le comparateur permet de travailler avec une gamme de tension d'entrée plus large que celle d'une porte logique, autorisant ainsi une marge d'erreur plus importante.

Notez que lors de l'expérience mettant en œuvre plusieurs capteurs à effet Hall, j'avais suggéré d'utiliser une porte NAND pour les relier. Cela était dû au fait que la sortie à collecteur ouvert d'un capteur à effet Hall passe à l'état bas quand il est activé. Un capteur optique se comporte de façon opposée, car lorsque la lumière infrarouge est bloquée, cela augmente la résistance interne apparente du phototransistor, rendant haut le niveau de sa sortie à collecteur ouvert, lorsqu'il est activé.

Si, dans un circuit, vous souhaitez inverser le comportement du capteur optique, vous pouvez y parvenir en utilisant la sortie émetteur du phototransistor dans un montage à collecteur commun (également appelé émetteur suiveur).

1. Déconnectez la résistance de rappel du collecteur du phototransistor. Déconnectez également le fil de masse de l'émetteur du phototransistor, et placez la résistance de rappel entre l'émetteur et la masse.
2. Reliez le collecteur du phototransistor, directement au pôle positif de l'alimentation.
3. Déplacez la connexion d'entrée de la porte OR du point C à l'émetteur du phototransistor.

La sortie du capteur devrait maintenant être normalement au niveau haut et passer au niveau bas quand le faisceau de lumière est bloqué.

En bref: les capteurs optiques transmissifs

- La valeur nominale de la tension requise par la LED infrarouge intégrée ne doit pas dépasser 1,5 V (environ 1,2 V de préférence). Sa consommation doit se situer entre 10 mA et 20 mA.
- Dans un circuit à collecteur ouvert, le phototransistor doit être relié à une résistance de rappel reliée au pôle positif de l'alimentation. Sa valeur varie largement selon le modèle de capteur. La tension du collecteur est basse lorsque le faisceau lumineux n'est pas bloqué, et haute quand le capteur est obstrué.
- Un circuit à collecteur commun (ou émetteur suiveur) inverse le comportement du capteur. Une résistance de rappel est placée entre l'émetteur du phototransistor et la masse. La sortie émetteur sera

haute quand le capteur n'est pas obstrué et basse quand il l'est.

- Les capteurs optiques transmissifs ne sont pas prévus pour pouvoir piloter une charge élevée. Leur sortie doit être reliée à l'entrée haute impédance d'un composant, par exemple un comparateur ou une porte logique.
- Souvenez-vous que la lumière émise par une diode LED infrarouge diminue avec le temps. Essayez de concevoir vos circuits de façon à ce qu'ils puissent fonctionner avec une intensité lumineuse réduite. Un comparateur acceptera une plus large gamme de tension de sortie du capteur qu'une porte logique.
- La lumière infrarouge n'étant pas visible, vous ne verrez rien lorsque le composant est en service. Ne le laissez pas sous tension par erreur !

Les fentes magiques améliorées

Dans quelle application pourriez-vous utiliser ce composant ? Pourquoi pas le détecteur de pièces du jeu de la fente magique ? Vous aurez besoin de seize capteurs, mais ils sont assez peu coûteux, et leur prix diminue de plus en plus.

Pour cette réalisation, je dois résoudre deux problèmes : comment relier les capteurs, et comment les installer dans un coffret permettant l'insertion des pièces ? Abordons d'abord le câblage.

Validation du concept

Vous vous rappelez probablement que dans la version originale du jeu, un multiplexeur génère une tension sur l'une de ses sorties (voir expérience 21). Pour vous rafraîchir la mémoire, reportez-vous aux illustrations des fig. 21-7 et fig. 21-8.

Le capteur optique nécessite si peu de courant que le multiplexeur est en mesure d'alimenter à la fois sa LED et son phototransistor. C'est une bonne solution car tous les autres capteurs non sélectionnés resteront hors tension, préservant ainsi leurs diodes LED.

L'autre raison pour laquelle j'aime cette solution tient au fait que chaque capteur peut piloter sa propre LED indiquant la pièce gagnante (si j'ajoute un étage amplificateur). Quand un joueur choisit la fente magique,

l'indication de succès s'allumera juste à côté de l'emplacement gagnant.

Ma seule préoccupation concerne l'ordre exact des opérations. Il s'agit d'un point délicat, je vais donc examiner ce qui se passe au niveau d'un seul capteur.

Sur la fig. 31-7, le capteur est inactif, car il n'est pas encore alimenté par le multiplexeur. Sa diode LED infrarouge est éteinte. Son phototransistor n'est pas alimenté non plus.

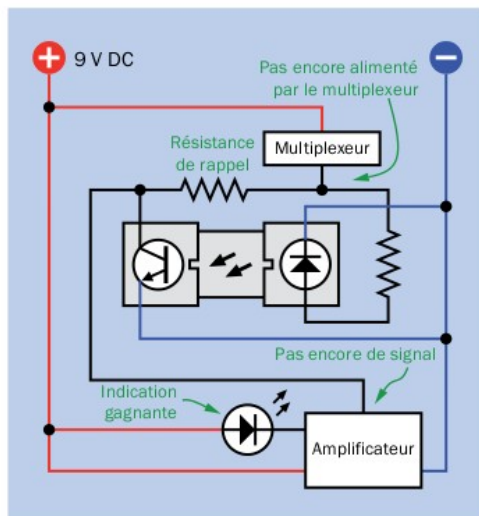


Figure 31-7. Étape 1 de la mise sous tension de l'un des capteurs de pièces.

L'alimentation est reliée à un amplificateur afin de piloter la LED gagnante. L'amplificateur est notre vieil ami, le réseau de transistors Darlington ULN2003 qui fournira du courant à la LED indiquant la fente gagnante, uniquement quand le signal de sortie du détecteur de pièce le lui commandera. Il n'y a pas encore de signal car le capteur n'est pas alimenté. En conséquence, la LED gagnante reste éteinte.

Observez maintenant la fig. 31-8. Le multiplexeur a sélectionné ce capteur pour devenir la fente magique. Il alimente la LED du capteur ainsi que son phototransistor. La LED infrarouge provoque immédiatement la

diminution de la résistance apparente du phototransistor qui absorbe du courant au travers de sa résistance de rappel. Le phototransistor consomme suffisamment de courant pour éviter d'en transmettre à l'amplificateur. En conséquence, l'entrée de l'amplificateur est au niveau bas et la LED de notification reste éteinte.

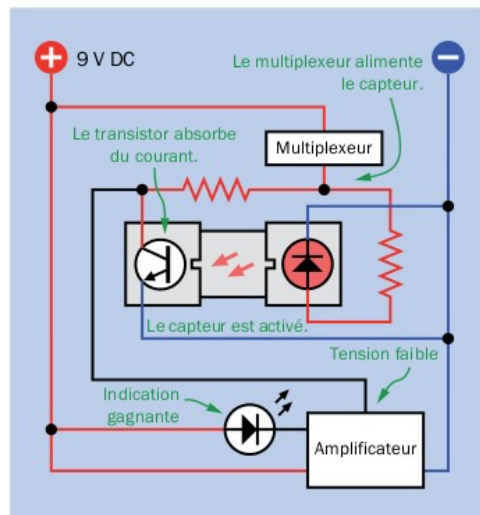


Figure 31-8. Étape 2 de la mise sous tension d'un des capteurs de pièces.

Pour terminer, sur la fig. 31-9 page suivante, un joueur insère une pièce dans la fente du capteur. Le phototransistor ne peut plus détecter la lumière infrarouge, sa résistance apparente devient élevée. La tension d'entrée de l'amplificateur est maintenant élevée et il allume la LED de notification gagnante.

Pensez-vous que cela puisse fonctionner ? Je n'en étais pas certain lorsque j'ai créé ce circuit. Je me demandais s'il y a avait une chance qu'au moment où le multiplexeur alimentait le capteur, ce dernier réagisse avec un peu de retard et que, durant cet instant, le phototransistor n'absorbe aucun courant envoyant un signal à l'amplificateur qui alimenterait alors la LED indiquant qu'il s'agit de la fente magique.

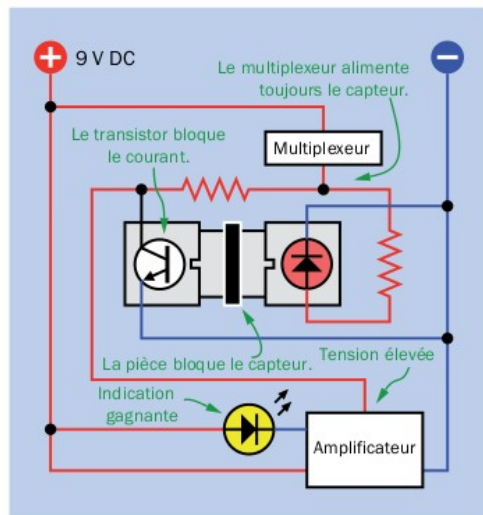


Figure 31-9. Étape 3 de la mise sous tension d'un des capteurs de pièces.

Néanmoins, quand j'ai câblé le circuit, j'ai pu constater que le capteur réagissait si rapidement que le courant atteignant l'amplificateur était très fugitif et ne parvenait pas à produire un allumage visible de la LED de notification. Oui, ce circuit fonctionne, mais il convient de l'essayer pour en être sûr. C'est ce que j'ai dû faire.

J'ai terminé la vérification de la validité du concept. Il reste maintenant à déterminer les valeurs correctes des résistances et à connecter l'ensemble sur la plaque de montage. En réalité, tout ne va pas tenir sur une platine de montage. Je peux câbler huit capteurs, ce qui constitue le maximum que peut accepter le réseau de transistors Darlington. Le câblage de la platine peut être dupliqué sur une deuxième plaque pour réaliser le jeu avec seize fentes.

Schéma

La fig. 31-10 illustre le schéma de trois capteurs reliés à un réseau de transistors Darlington. L'espace n'étant pas illimité et chaque capteur étant câblé de la même manière, je vous laisse ajouter cinq autres capteurs connectés de la même façon au schéma de la figure.

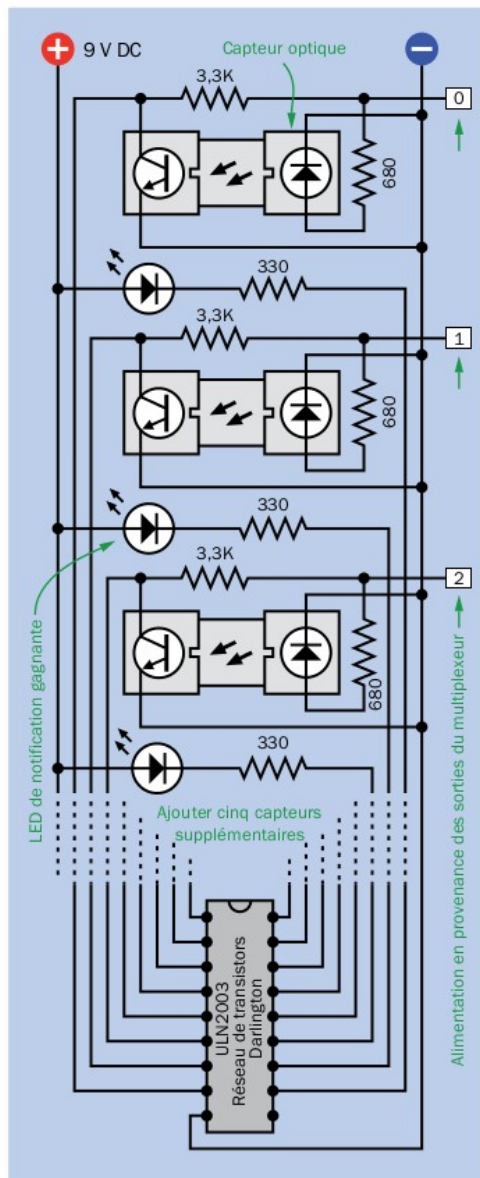


Figure 31-10. Trois des seize capteurs et un des deux réseaux de transistors Darlington sont nécessaires à la réalisation des détecteurs de pièces du jeu de la fente magique.

- Les points d'entrée numérotés 0, 1 et 2 sur le côté droit correspondent aux sorties du multiplexeur du montage original du jeu de la fente magique (voir fig. 21-7).
- Chaque capteur a été tourné de 90° par rapport à sa position dans le schéma de test de la fig. 31-5. Je les ai orientés ainsi afin de minimiser les croisements des fils reliés au réseau de transistors Darlington. Faites attention de bien monter les capteurs en plaçant leur LED à droite, et non à gauche.
- J'ai augmenté la valeur des résistances en série avec chaque LED à 680 Ω , et chaque résistance de rappel des sorties à collecteur ouvert vaut maintenant 3,3K. Ceci a été fait car le circuit va être commandé par le multiplexeur qui est alimenté en 9 V DC. Nous n'utilisons pas de circuits de type 74HC00, la tension de 5 V DC n'est donc pas obligatoire et pourrait même être inadéquate en raison de la résistance interne présentée par le multiplexeur, qui va légèrement réduire la tension délivrée.
- Le circuit intégré des transistors Darlington absorbe le courant (il ne le fournit pas) ; chaque LED de notification gagnante est donc reliée au pôle positif de l'alimentation.
- Bien que l'alimentation de chaque capteur provient du multiplexeur de la fig. 21-7, le réseau Darlington est alimenté directement par la source d'alimentation. De cette façon, nous n'ajoutons pas cette charge au multiplexeur.
- Chaque paire de transistors Darlington a une impédance d'entrée plus faible que celle de la porte OR utilisée lors du test précédent. De ce fait, un transistor Darlington fait chuter légèrement la tension de sortie d'un capteur activé. J'ai essayé diverses valeurs de la résistance de rappel du capteur et j'ai déterminé que 3,3K était le meilleur compromis. Vous pourrez l'augmenter si vous n'avez pas une indication franche de la LED de notification.
- Je suggère une résistance en série avec chaque LED de notification. Celles que j'utilise admettent une tension directe de 2 V DC. Si vous utilisez un type de LED différent, vous devrez peut-être modifier la valeur de la résistance série. Vérifiez pour cela la tension aux bornes de votre LED lorsqu'elle est allumée, contrôlez également l'intensité qu'elle absorbe.

- Une paire de transistors Darlington peut absorber 100 mA sans dommage, vous n'avez donc pas à vous inquiéter de leur surcharge éventuelle.

Réalisation

Le schéma de la fig. 31-11 illustre le câblage que vous pouvez réaliser pour chaque capteur. Il n'occupe que quatre rangées sur une plaque de montage, y compris la LED de notification gagnante, placée à côté du capteur. Les traits gris sont les conducteurs internes à la plaque. Les broches des capteurs sont représentées par des cercles noirs au centre blanc.

La ligne diagonale qui relie deux broches du capteur est un fil de pontage qui doit être inséré dans la platine avant que le capteur ne soit placé au-dessus.

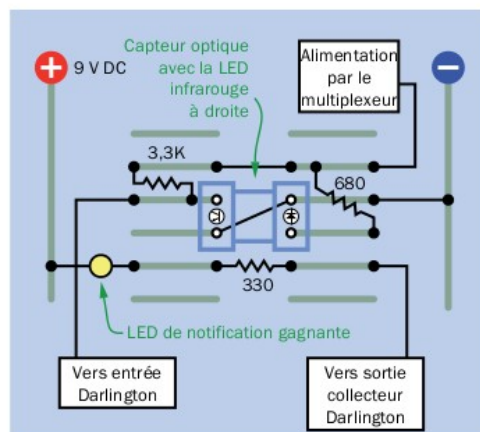


Figure 31-11. Câblage possible d'un des capteurs sur une platine de montage, réduisant au maximum la place occupée.

Les composants étant très proches les uns des autres, soyez prudent en les mettant en place. Si vous mettez une résistance ou un fil de liaison à côté de son emplacement prévu, vous pourriez par exemple inverser la tension d'un capteur et le griller. Pour ma part, en vérifiant le fonctionnement de mon propre circuit, j'ai détruit deux capteurs. L'impatience, comme toujours, en était l'unique raison. C'est mon problème.

La fig. 31-12 présente une photo de mon câblage avec les huit capteurs. Ce circuit doit être dupliqué afin de prendre en compte les huit autres capteurs.

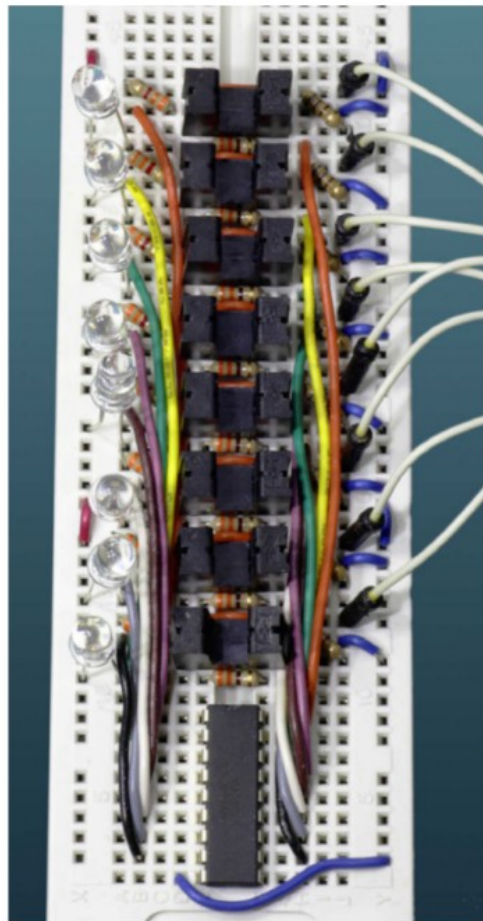


Figure 31-12. Circuit sur une plaque de montage, sur laquelle sont reliés huit des seize capteurs du jeu de la fente magique.

Sur cette photo, les fils de liaison de couleur blanche venant de la droite sont reliés aux sorties du multiplexeur du circuit du jeu de la fente magique de la fig. 21-7. Ayant choisi des LED brillantes, leur boîtier de 5 mm de diamètre est transparent, comme vous les voyez, alignées sur la gauche.

Qu'en pensez-vous ? Êtes-vous prêt à affronter les difficultés pour créer une interface utilisateur claire pour insérer les pièces sans effort dans les fentes, au lieu de devoir les pousser entre deux plaques de métal ? Personnellement, je pense que oui, et quand vous verrez ma proposition pour réaliser un élégant coffret (j'y viens), vous serez peut-être convaincu.

Le coffret

La meilleure manière de réaliser ce circuit de façon permanente serait de souder tous les composants sur une plaque perforée et de la placer sous les interstices percés dans le couvercle d'une boîte. Je ne suis pas trop en faveur de cette solution, car elle ne permettrait pas une insertion correcte des pièces.

Je pense qu'une meilleure solution consisterait à enfermer les capteurs entre deux plaques de bois ou de plastique opaque collées ensemble.

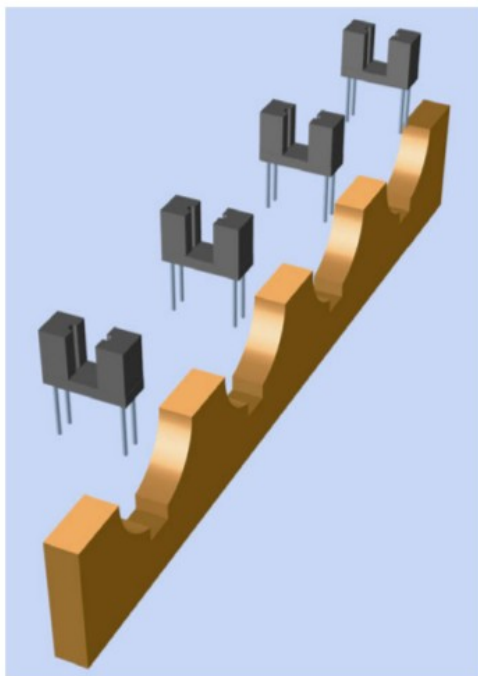


Figure 31-13. Première étape d'assemblage des capteurs dans un boîtier.

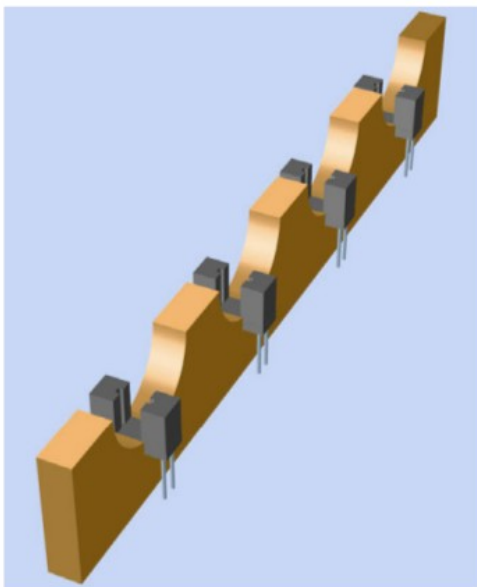


Figure 31-14. Les capteurs sont placés dans les découpes au fond des réceptacles des pièces.

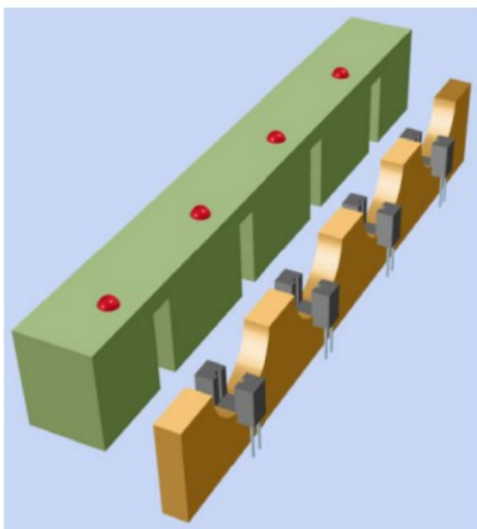


Figure 31-15. Un séparateur maintient les capteurs en place et évite toute fuite de lumière infrarouge entre les capteurs.

La première étape de cette réalisation est illustrée sur la fig. 31-13 où se situent quatre capteurs et une plaque de 6 mm d'épaisseur, en bois ou en plastique, ayant des réceptacles semi-circulaires pour les pièces.

La fig. 31-14 montre comment les capteurs sont placés dans les entailles au creux des découpes en demi-cercles.

Ensuite, sur la fig. 31-15, un séparateur de 20 mm est ajouté, avec les LED montées dans les trous percés verticalement.

Après avoir ajouté quatre séparateurs et quatre supports de pièces, il ne reste plus qu'à intégrer un séparateur supplémentaire sur la face avant et installer l'ensemble dans un coffret qui contiendra le circuit électronique dans son fond.

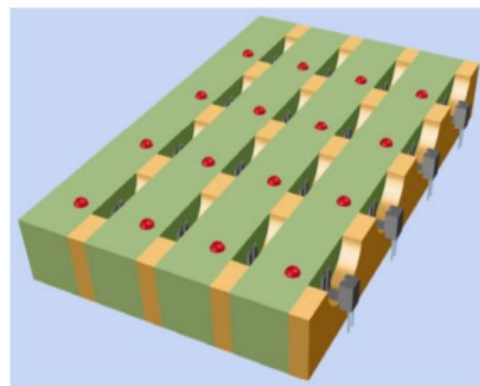


Figure 31-16. Un séparateur supplémentaire est nécessaire sur la face avant, après quoi, l'ensemble pourra prendre place dans un coffret.

La découpe des pièces constituant cet assemblage n'est pas très compliquée. Les plans sont présentés sur la fig. 31-17 page suivante. Les couleurs utilisées n'ont aucune signification, elles ont été ajoutées pour rendre la distinction entre les différentes pièces plus évidente.

Les séparateurs sont réalisés en bois ou en plastique de 20 mm d'épaisseur. Si vous utilisez du bois, choisissez-le dur car il n'y a que 5 mm au-dessus de chaque entaille et du bois tendre ne serait pas assez rigide.

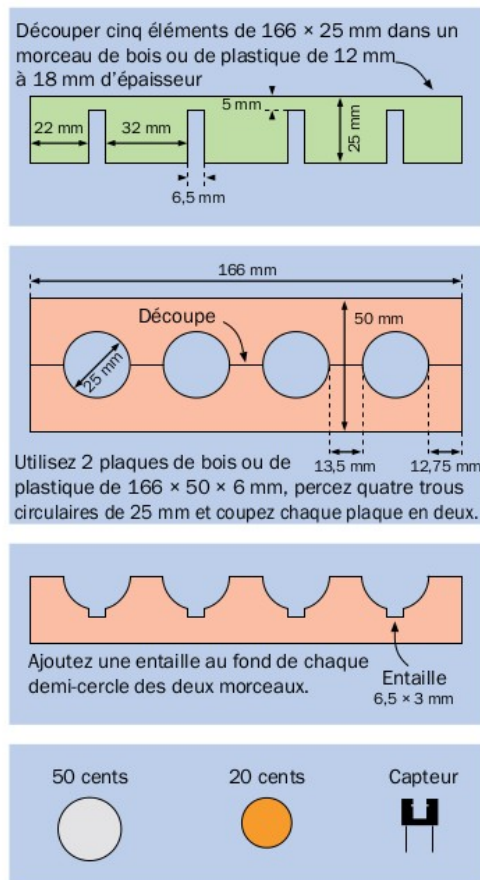


Figure 31-17. Plans de découpe des différentes sections à assembler pour enfermer seize capteurs, leurs fentes d'insertion des pièces de monnaie et les LED indiquant la pièce gagnante.

Les réceptacles des pièces sont construits en découpant quatre cercles de 25 mm de diamètre dans deux morceaux de bois ou de plastique mesurant $166 \times 50 \times 6$ mm. L'épaisseur doit être au maximum de 6,35 mm (1/4), afin de correspondre à l'écartement des capteurs. Si vous avez des difficultés pour trouver du bois de cette épaisseur, de l'aggloméré de bonne qualité et de cette épaisseur conviendra. J'utilise un foret spécial pour réaliser la découpe, mais une scie sauteuse pourra convenir, en l'utilisant minutieusement. Il serait préférable d'utiliser du plastique, tel que de l'ABS.

Après avoir percé les trous circulaires, découpez chaque morceau en deux dans sa longueur. L'entaille au fond de chaque demi-cercle pourra être créée à l'aide d'une lime métallique plate ou d'une petite lime carrée.

N'oubliez pas de percer les trous verticaux dans les séparateurs, de façon à y incorporer les LED avant de commencer l'assemblage des pièces. Vous devrez rallonger les fils des LED à l'aide de fil de câblage de section $0,2 \text{ mm}^2$, pour les faire ressortir de chaque trou. Si vous utilisez des LED de 5 mm sans rebord, elles prendront facilement place dans des trous légèrement plus grands que 5 mm. Ajoutez une goutte de colle époxy pour maintenir chaque LED en place.

Utilisez également un peu de colle époxy pour maintenir chaque capteur dans son entaille. Attention de ne pas déposer de colle sur les fils des capteurs. Soyez également vigilant à orienter correctement les capteurs. Il serait prudent de faire un croquis pour vous rappeler leur orientation car, quand vous enfermerez le tout dans le coffret, il vous sera difficile de le déterminer.

Les fentes sont prévues pour recevoir la plupart des pièces de monnaie courantes à même d'interrompre le faisceau lumineux des capteurs. Si les pièces que vous utilisez ont un diamètre supérieur à 25 mm, il faudra percer des trous plus importants.

Si vous retournez l'ensemble, vous verrez que les fils des capteurs sont accessibles, vous pouvez donc réaliser l'ensemble des réceptacles des pièces et les séparateurs avant de commencer tout câblage.

Les circuits intégrés du circuit peuvent être placés sur plusieurs plaques de connexions perforées, reliées aux capteurs à l'aide de câble plat. Ajoutez ensuite quatre côtés en bois ou en plastique pour former un coffret contenant les seize réceptacles des pièces et les circuits du jeu.

Ce projet est placé en tête de ma liste des circuits à construire, je regrette de ne pas avoir de photo de l'ensemble terminé. J'aimerais en commencer la réalisation dès maintenant, mon objectif premier est toutefois de terminer l'écriture de cet ouvrage, afin que vous puissiez entamer vous-même la réalisation de ce jeu.

Dans un sens, il est intéressant que je ne puisse pas vous montrer le coffret que j'aurais pu réaliser. Ainsi, vous ne serez pas influencé (en bien ou en mal) par le travail d'un d'autre.

Améliorez le jeu d'Ovide

Expérience

32

Dans l'expérience 23, vous vous souvenez sûrement que je recherchais un meilleur moyen de distinguer les jetons d'un joueur par rapport à ceux de l'autre joueur, lors d'une partie du jeu d'Ovide. Le mieux que je pouvais faire alors était de suggérer que chaque joueur appuie sur un bouton pour s'identifier.

Avec des capteurs, cela n'est plus nécessaire.

Supposons que l'un des joueurs utilise des pions magnétiques et l'autre non, et qu'ils puissent s'insérer dans les cases du plateau de jeu. Si chaque case est équipée d'un capteur à effet Hall (qui réagit à la présence des jetons magnétiques mais pas aux autres) et d'un capteur à infrarouge transmissif (qui réagit à la présence de tous les jetons), nous pourrions alors distinguer les deux types de jetons automatiquement.

Cela ressemble à un problème de logique, exprimons-le par des mots.

L'option logique

Voici la façon dont cela devrait fonctionner.

Si le capteur infrarouge est activé ET (AND) que le capteur à effet Hall n'est PAS (NOT) activé, nous avons un jeton non magnétique dans la case.

Si le capteur infrarouge est activé ET (AND) que le capteur à effet Hall l'est également, nous avons un jeton magnétique dans la case.

Ceci est repris dans le diagramme logique sur la fig. 32-1. Remarquez que le triangle inversé, avec un petit cercle en bas, est un inverseur, qui change une sortie de niveau haut en niveau bas. J'ai évoqué les inverseurs dans *L'Électronique en pratique*, mais sans en utiliser jusqu'à présent dans ce livre.

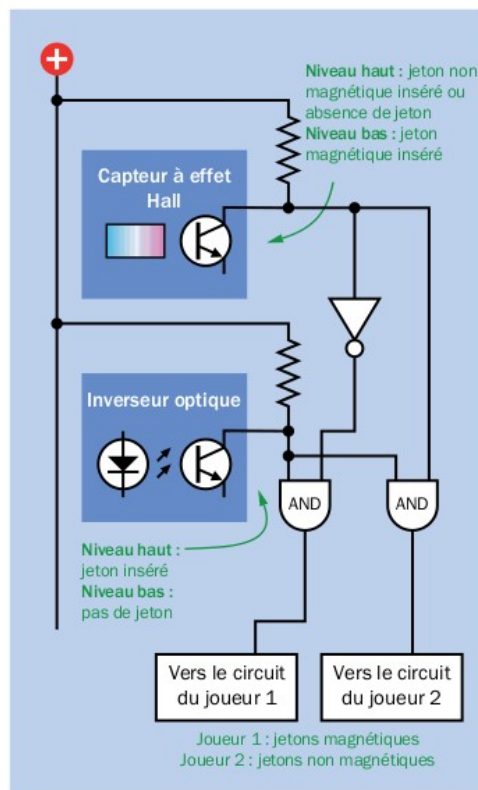


Figure 32-1. Deux portes AND et un inverseur sont utilisés pour activer correctement les circuits logiques indiquant le vainqueur du jeu d'Ovide, selon qu'un jeton magnétique (pour le joueur 1) ou non magnétique (pour le joueur 2) a été inséré dans le jeu.

La sortie de la porte AND de droite sera reliée au réseau de portes logiques déterminant si le joueur qui utilise des jetons non magnétiques en a aligné trois. La sortie de la porte AND de gauche sera reliée aux circuits déterminant s'il s'agit du joueur utilisant des jetons magnétiques. Un des ces circuits est présenté sur la fig. 23-4. Dans ce schéma, chaque interrupteur devra être remplacé par les capteurs décrits précédemment, reliés par une porte AND.

Il y a un problème potentiel, car les capteurs ne s'activeront pas simultanément. Le capteur à effet Hall devrait s'activer en premier, dès qu'un jeton magnétique s'approchera de son emplacement.

Je ne pense pas que ce soit un réel problème, car rien ne se produira tant que la sortie du capteur optique n'est pas activée. C'est en effet nécessaire pour activer l'une ou l'autre des portes AND.

La complexité du système de capteurs me préoccupe davantage. Le plateau du jeu complet possède neuf cases. La réalisation du circuit nécessitera quatre circuits intégrés quadruples portes AND à deux entrées, et deux sextuples inverseurs. Tout cela représente beaucoup de liaisons. Existe-t-il une possibilité de faire plus simple ?

Commutez à nouveau

Comme à l'accoutumée, il n'y a pas de méthode précise pour optimiser. Il faut juste faire preuve d'un peu de créativité. En premier lieu, reconsidérons le rôle des capteurs. Ils remplissent, en fait, plusieurs fonctions.

- Le capteur optique dit : « Y a-t-il un jeton inséré ? »
- Le capteur à effet hall dit : « Est-ce un jeton magnétique ou un jeton non magnétique ? »

Il s'agit d'une opération en deux étapes. La première étape a une sortie VRAI ou FAUX, ce qui me fait penser à une porte logique. En revanche, la seconde étape a une sortie soit l'UN, soit l'AUTRE, ce qui ne ressemble pas à une porte logique, mais plutôt à un interrupteur inverseur ! Un capteur à effet Hall n'est donc peut-être pas le meilleur choix pour cette opération. Qu'en serait-il si je le remplaçais par un interrupteur inverseur à lames souples ?

J'ai dit précédemment que les interrupteurs Reed, inverseurs à un pôle existaient. J'ai également précisé que les interrupteurs à lames souples créaient des problèmes quand on les utilisait avec des portes

logiques, en raison des rebonds de leurs contacts. En revanche, leurs contacts s'établissent très rapidement. Ainsi, si l'interrupteur Reed est activé en premier, dès que le joueur insère son jeton, le contact devrait s'être stabilisé pendant qu'il le glisse dans son emplacement et active le capteur optique. À partir du moment où le capteur dit « il y a un jeton », l'interrupteur Reed devrait indiquer sans hésitation le type de jeton inséré.

En conséquence, le circuit de détection peut être simplifié au point d'éliminer totalement les portes logiques. Le capteur optique génère une sortie haute ou basse, et l'interrupteur Reed l'achemine vers les portes AND du joueur A ou du joueur B. Voyez le circuit sur la fig. 32-2.

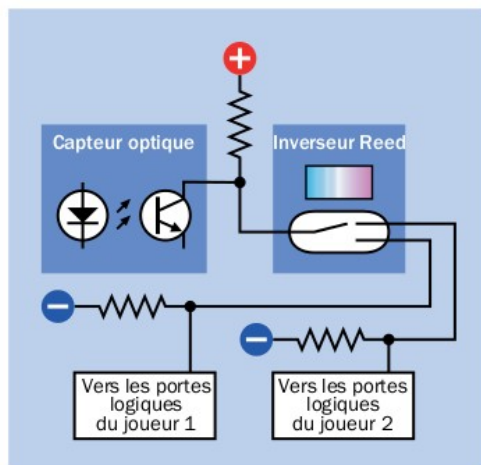


Figure 32-2 L'utilisation d'un interrupteur Reed inverseur SPDT au lieu d'un capteur à effet Hall permet d'éliminer les portes logiques qui étaient nécessaires dans la version précédente du circuit de détection.

Le problème est qu'un interrupteur va laisser un circuit ouvert, et que les portes logiques ne doivent jamais avoir une entrée ouverte. Nous devons donc ajouter des résistances de rappel vers la masse. La valeur de ces résistances doit être relativement haute. Afin que les signaux issus des capteurs optiques, puissent les contrer et changer la tension d'entrée.

Sur la fig. 32-2, la résistance de rappel du capteur optique sera d'environ 2K. La résistance de rappel à la masse de chaque circuit, de 10K.

Tout cela paraît bien, mais, dans le jeu d'Ovide, un joueur peut retirer un jeton et le positionner dans une autre case. N'allons-nous pas, à nouveau, subir les rebonds de l'interrupteur, quand le champ magnétique disparaîtra ? Si, bien entendu, mais quand le retrait du jeton aura permis à l'interrupteur Reed de basculer dans l'autre position, le capteur optique aura déjà changé sa sortie du niveau haut au niveau bas. De plus, l'hystérésis du capteur optique assure un signal de sortie propre.

Problèmes magnétiques

L'autre problème à résoudre concerne l'adéquation entre l'aimant et l'interrupteur à lames souples. L'aimant doit être suffisamment puissant pour actionner l'interrupteur de façon fiable, mais pas trop, afin de ne pas perturber les interrupteurs voisins. Je pense que les trous du plateau de jeu devront être espacés d'au moins 25 mm et que les interrupteurs Reed devront être situés à une distance raisonnable en dessous, afin qu'aucun ne puisse être activé lorsqu'un joueur laisse tomber un jeton sur le plateau. Un jeton pourrait ressembler à un bâtonnet muni d'un aimant à son extrémité. Supposez que vous utilisiez un aimant rectangulaire d'environ 6 x 12 mm, de 2 mm d'épaisseur. Vous pourriez découper une cavité à l'extrémité d'un bâtonnet de plastique ou de bois, y insérer un aimant et le coller.

Assurez-vous également que l'aimant et l'interrupteur Reed sont correctement orientés l'un par rapport à l'autre. Alors qu'un interrupteur Reed SPST n'est pas très exigeant concernant sa position vis-à-vis du champ magnétique, les lames d'un interrupteur Reed SPDT doivent être « poussées » ou « tirées » l'une par rapport à l'autre. Je pense qu'il est donc nécessaire que le jeton du jeu ait une forme qui évite qu'il soit inséré selon une mauvaise orientation. Ils pourraient avoir une forme en T, s'insérant dans des trous de forme similaire.

Ceci me fait penser à une autre possibilité. Si les jetons étaient suffisamment larges, ils pourraient avoir un aimant d'un côté mais pas de l'autre. Ainsi, le joueur 1 utiliserait des jetons avec l'aimant placé à gauche des bâtonnets alors que le joueur 2 jouerait avec des jetons ayant leur aimant placé du côté droit. On pourrait ainsi se passer des capteurs optiques, en disposant deux interrupteurs Reed à l'opposé l'un de l'autre dans chaque trou. Un jeu des interrupteurs Reed serait activé par les jetons du joueur 1, l'autre jeu par ceux du joueur 2. La façon dont cela pourrait fonctionner est illustrée sur la fig. 32-3.

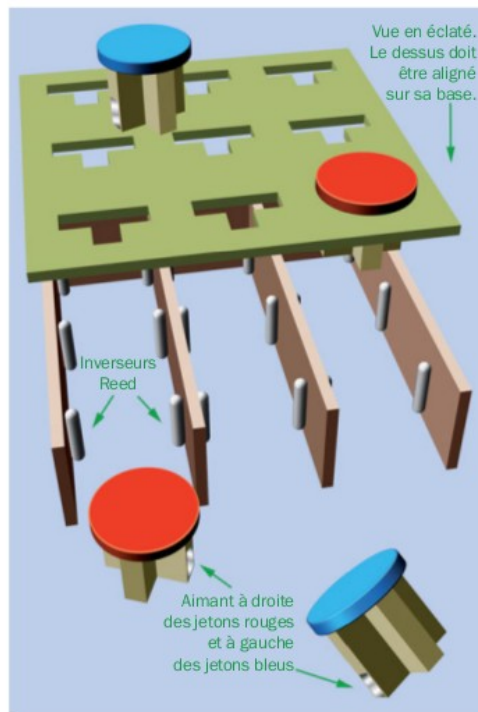


Figure 32-3. Vue schématisée du jeu utilisant un groupe d'interrupteurs Reed activés par les jetons du joueur 1 et un second groupe activés par les jetons de l'autre joueur. Afin d'éviter l'activation des deux interrupteurs Reed placés dos à dos sur chaque cloison séparatrice, leur épaisseur devrait être nettement plus importante dans une réalisation fonctionnelle.

Cette solution, présente l'avantage de n'avoir qu'à remplacer les poussoirs du jeu original par des interrupteurs Reed SPST. Beau travail !

Une vérification minutieuse sera nécessaire afin de vous assurer de la fiabilité du jeu. C'est la face cachée des capteurs : vous devez vous accommoder du comportement mécanique des objets du monde réel.

Pour aller plus loin : utilisation d'un microcontrôleur

Le jeu d'Ovide est difficilement adaptable à un microcontrôleur, car il y a neuf cases sur le plateau de jeu, et chacune peut avoir trois états : vide, occupée par le joueur 1 ou occupée par le joueur 2. Cela exige un grand nombre d'entrées, qui peut toutefois être minimisé grâce à un codage matriciel, système souvent utilisé pour détecter si quelqu'un appuie sur une touche d'un clavier. Avec une matrice trois par trois, le microcontrôleur sélectionnerait chaque rangée dont il vérifierait chaque colonne pour voir si une liaison existe à leur intersection. La fig. 32-4 illustre ce mécanisme. En utilisant un tel système, le microcontrôleur n'utiliserait que trois sorties et trois entrées au lieu de neuf entrées. Remarquez que des diodes sont nécessaires, afin d'éviter au courant de se propager incorrectement quand plusieurs interrupteurs sont activés simultanément.

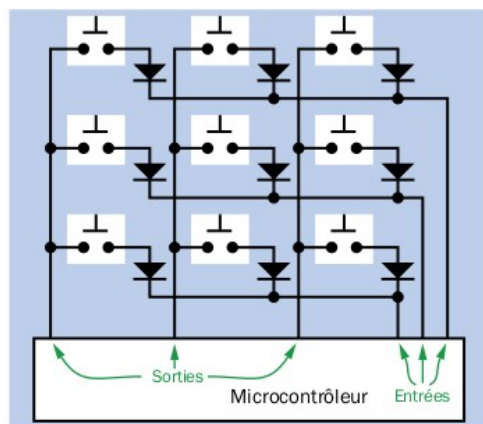


Figure 32-4. Principe de l'encodage matriciel.

Dans le jeu d'Ovide, si deux groupes d'interrupteurs sont utilisés par deux joueurs, le codage matriciel peut être modifié, comme présenté sur la fig. 32-5. Sur cette figure, les deux groupes d'interrupteurs ont été colorés en rouge pâle et en bleu pâle pour indiquer le jeu qui sera activé par les jetons d'un des joueurs alors que l'autre groupe sera activé par les jetons de l'autre joueur.

Pourrait-on procéder différemment en utilisant des phototransistors qui feraient la différence entre des jetons noirs ou opaques et des jetons transparents sous un éclairage de lumière visible ?

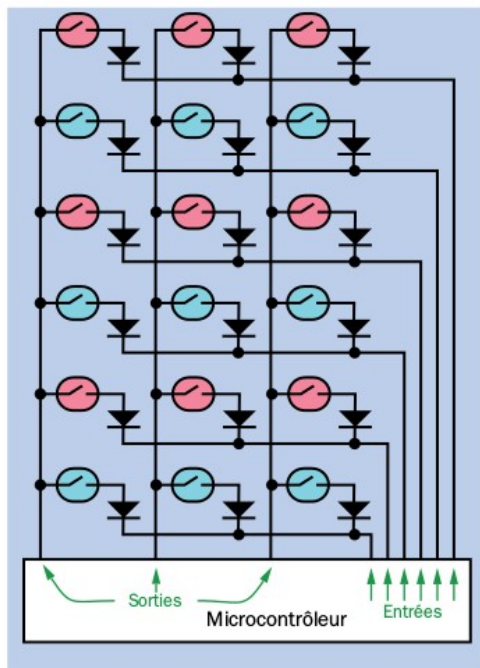


Figure 32-5. Encodage matriciel du jeu d'Ovide, dans lequel les deux joueurs activent séparément deux groupes d'interrupteurs à lames souples, colorés en rouge pâle et en bleu pâle.

Pourrait-on encore utiliser un phototransistor pour distinguer des jetons de couleurs différentes, rouges et verts par exemple, si on les éclairait par des LED de différentes couleurs ? La couleur verte paraît lumineuse sous un éclairage vert mais sombre sous une lumière rouge. Inversement, la couleur rouge paraît lumineuse sous un éclairage rouge mais sombre sous une lumière verte. Vous pourriez utiliser un comparateur pour déterminer si un jeton rouge ou un jeton vert est inséré dans le trou.

Il est sans doute possible d'imaginer d'autres possibilités pour identifier les jetons. La meilleure solution sera celle qui est fiable, économique, facile à utiliser, esthétiquement agréable et relativement facile à mettre en œuvre. J'aimerais que vous me fassiez part de vos idées.

Maintenant que j'ai tenu ma promesse et amélioré le jeu d'Ovide, je vais aborder l'utilisation d'autres types de capteurs.

Tout le monde connaît le bon vieux potentiomètre. Rien que dans cet ouvrage, j'ai peut-être utilisé une vingtaine de potentiomètres ajustables dans différents circuits.

Dans l'électronique grand public, il en va différemment. Votre autoradio a probablement encore un bouton de réglage du volume d'écoute, mais il tourne de 360 degrés, sans butée. Cela laisse à penser qu'à autre chose qu'un potentiomètre se cache derrière.

Quel composant a pris sa place ? La réponse est un encodeur rotatif, ou un encodeur incrémental, ou encore un encodeur mécanique (car il possède des contacts mécaniques). Quelques exemples sont présentés sur la fig. 33-1. Leur apparence rappelle celle d'un potentiomètre ; en fait, la plupart d'entre eux ont même trois broches de connexion. En revanche, ils fonctionnent de façon totalement différente.



Figure 33-1. Quelques modèles d'encodeurs rotatifs très courants et peu coûteux.

Définition d'un encodeur rotatif

Dans un premier temps, distinguons clairement les différents types d'encodeurs. Je ne fais évidemment pas allusion aux circuits intégrés encodeurs. Nous les avons déjà étudiés en détail et vous avez sûrement noté qu'ils ne disposent pas de bouton de commande.

Un encodeur rotatif possède un axe et au minimum deux broches de connexion. Il génère, en général, un train d'impulsions à partir de ses contacts internes lorsque son axe tourne. Un autre composant (en général un microcontrôleur) interprète ce train d'impulsions et fournit la réponse adéquate. Il peut ajuster le volume sonore d'un appareil audio, balayer quelques indications sur un écran, ou exécuter toute autre tâche spécifiée par son programme.

À l'origine, les encodeurs rotatifs étaient des composants de haute technologie, utilisant souvent des méthodes optiques pour mesurer avec précision la rotation (plus de 100 intervalles sur une circonférence de 360 degrés). Cette définition a changé. Tout composant contenant des contacts qui génèrent une suite d'impulsions en tournant son axe peut être considéré comme étant un encodeur rotatif.

Spécifications

Pour cette expérience, vous aurez besoin d'un encodeur rotatif ayant les caractéristiques suivantes :

- Sortie en « quadrature » (j'expliquerai plus loin ce que cela signifie).
- Une résolution de 24 changements d'état, par rotation de 360 degrés au minimum. Ce qui peut également s'exprimer en impulsions par tour, ou PPR (*Pulses Per Revolution*).

- Nombre de pas mécaniques identique au nombre d'impulsions par tour. Les pas mécaniques sont des petits crans qui apportent une résistance, pas à pas, à la rotation de l'axe.

Le modèle Bourns ECW1J-B24-BC0024L est celui suggéré, mais il existe une bonne centaine de modèles offrant 24 impulsions par tour. Ce domaine évolue si rapidement que toute référence que je pourrais vous indiquer à présent sera probablement vite remplacée par un modèle différent. N'ayez pas peur d'acheter un autre encodeur, pourvu que vous lisiez attentivement ses caractéristiques.

Certains encodeurs ne délivrent pas une sortie en quadrature et ont davantage ou moins que trois bornes de liaison. Je n'étudierai pas ces modèles dans ce livre.

Train d'impulsions

Démontrer le fonctionnement d'un encodeur rotatif est chose facile. Bien que les contacts internes ne supportent pas une intensité importante, ils peuvent tolérer les quelques milliampères nécessaires à l'allumage d'une diode LED.

Reliez votre encodeur comme sur la fig. 33-2. Beaucoup d'encodeurs possèdent des fils ou broches de sortie espacés de 2,54 mm qui vous permettront de les enficher dans une plaque de montage, comme sur la fig. 33-3.

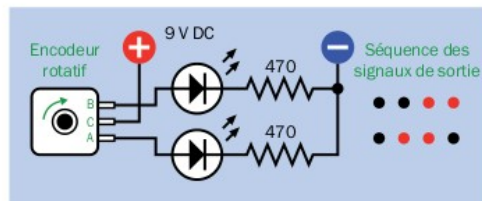


Figure 33-2. Lorsqu'un encodeur rotatif est connecté comme ci-dessus, ses deux broches de connexion externes généreront les séquences d'impulsions indiquées.

Faites tourner l'axe très lentement, vous observerez les LED s'allumer selon la séquence indiquée sur la fig. 33-2. Tournez maintenant l'axe dans le sens opposé, vous verrez alors la séquence s'inverser d'elle-même. C'est ce que j'ai précédemment appelé le train d'impulsions.

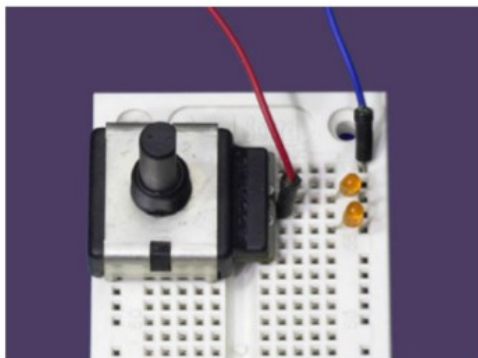


Figure 33-3. De nombreux encodeurs comme celui-ci peuvent être testés sur une plaque de montage dans laquelle ils s'insèrent directement.

Notez que les points noirs sur le diagramme ne représentent pas un niveau logique bas. La sortie d'un encodeur est soit haute, soit ouverte, car il est constitué d'interrupteurs miniatures. Quand ils sont ouverts, leur circuit n'est pas relié.

La broche centrale d'un encodeur peut être reliée à la masse, plutôt qu'au pôle positif de l'alimentation que j'ai choisi d'utiliser. Dans ce cas, la sortie consiste en une série d'impulsions au niveau de la masse ou ouvertes, au lieu d'impulsions au niveau positif de l'alimentation ou ouvertes.

Attention : encodeurs de mauvaise qualité

Si la séquence de sortie créée par votre encodeur n'est pas identique à celle des points rouges et noirs de la fig. 33-2, ou si vous constatez des hésitations ou des clignotements, cela pourrait être dû à un encodeur de mauvaise qualité. En payant un peu plus cher, vous pourrez obtenir une sortie plus régulière et plus propre. Cela s'avère absolument indispensable pour l'expérience suivante.

À l'intérieur d'un encodeur

Les impulsions que vous avez observées sont créées par deux paires de contacts, situées à l'intérieur de l'encodeur et montées de façon légèrement décalée l'une par rapport à l'autre (ce qui signifie qu'elles sont déphasées). La fig. 33-4 illustre ce principe.

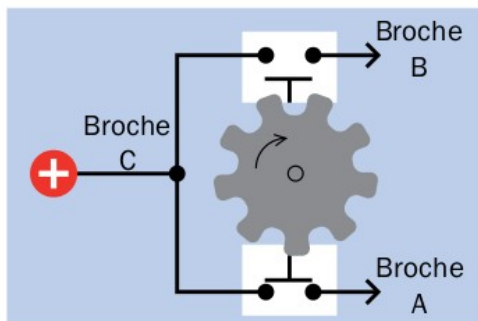


Figure 33-4. Dans ce schéma, les poussoirs représentent les paires de contacts à l'intérieur d'un encodeur en quadrature.

La fig. 33-5 représente la sortie obtenue. Chacune des lignes blanches pointillées représentent un cran de détente, la combinaison des sorties A et B changent d'un cran à l'autre.

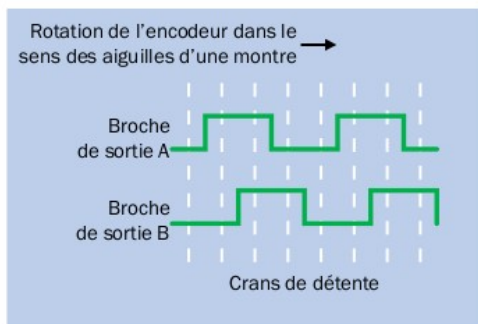


Figure 33-5. Sorties d'un encodeur dans lequel le nombre de détentes est identique à la résolution.

La façon dont les encodeurs sont présentés peut prêter à confusion. Les règles sont les suivantes.

- Un encodeur du type décrit ici, avec deux broches de sortie qui ont quatre combinaisons ouvert-fermé, est appelé un encodeur en quadrature.
- La résolution est le nombre de transitions de chaque sortie, soit ouverte, soit fermée, multipliée par le nombre de broches de sortie (deux dans le cas d'un encodeur en quadrature) pour une rotation complète, soit 360 degrés.
- La résolution est donc égale au nombre de changements d'état pour un tour complet.

- Le terme PPR (*Pulses Per Revolution*) compte aussi bien le nombre d'impulsions ouvertes que celui d'impulsions fermées. PPR est donc synonyme de résolution.

Utilisation des encodeurs

Un encodeur est un composant passif très peu évolué. Tout ce qu'il est capable de faire est de commuter ses interrupteurs internes, confiant à un autre composant, plus intelligent, l'interprétation du train d'impulsions fourni.

Cet autre composant pourrait être un circuit intégré logique, mais si vous prévoyez d'utiliser un encodeur rotatif avec un type quelconque de composant logique, il y a un point très important à ne pas oublier.

Vous devez toujours utiliser une résistance de rappel, soit vers la masse, soit vers le pôle positif de l'alimentation, sur les sorties de l'encodeur, afin qu'elles aient un niveau défini lorsque les interrupteurs internes sont en position ouverte.

Cette règle s'applique également si vous utilisez un encodeur rotatif en entrée d'un microcontrôleur, ce qui est l'utilisation la plus fréquente.

Supposons que l'encodeur permette un réglage de volume. Quand vous tournez son bouton, le microcontrôleur détermine le sens de la rotation, en comparant les trains d'impulsions des deux broches de sorties. Par exemple, si l'interrupteur A se ferme avant l'interrupteur B, l'axe de l'encodeur est manœuvré dans le sens des aiguilles d'une montre. En revanche, si l'interrupteur B se ferme en premier, la rotation est dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Une fois cela défini, le microcontrôleur compte le nombre d'impulsions pour déterminer de combien vous voulez augmenter ou diminuer le volume.

La programmation d'un microcontrôleur pour réagir de cette manière est plus complexe qu'il n'y paraît, car, en plus d'un certain nombre d'autres tâches fastidieuses, le programme doit ignorer les rebonds créés par un encodeur. Par chance, je n'ai pas à m'en soucier, car je ne vais pas utiliser un encodeur conjointement avec un microcontrôleur. J'ai mes propres idées pour cela.

Vous pourriez vous demander quelle est la place d'un encodeur dans un livre traitant des capteurs, car c'est plutôt un dispositif d'entrée qu'un capteur.

C'est exact. Ce n'est pas un capteur. Il s'agit bien d'un dispositif d'entrée, mais je pense qu'il est intéressant de connaître ce composant que j'utiliserai par ailleurs comme un capteur.

Rendez cela aléatoire

Si un encodeur est symétrique et que quelqu'un tourne son axe vers une position quelconque, il existe autant de chances que ses deux sorties A et B soient au niveau bas, ou que A soit au niveau haut et B au niveau bas, ou encore que A soit au niveau bas et B au niveau haut, ou enfin que A et B soient au niveau haut.

Hum, ces combinaisons ressemblent aux combinaisons possibles de deux digits binaires et, à vrai dire, on peut les utiliser ainsi.

J'ai rapidement envisagé cette possibilité dans un article que j'ai écrit pour le magazine *Make*, à propos d'une « boîte au 8 magique » qui fonctionne selon le principe du jeu célèbre « boule magique numéro 8 ». Mon idée était alors d'attacher un contrepoids en plomb à l'axe d'un encodeur, comme le montre la fig. 33-6.

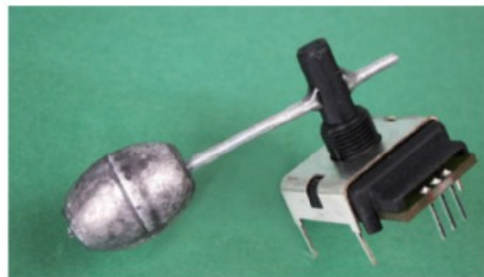


Figure 33-6. Un lest en plomb utilisé par les pêcheurs a été attaché à cet encodeur par une tige en fil étamé.

J'ai percé un trou dans l'axe en plastique d'un encodeur, un autre trou dans le lest en plomb. J'ai ensuite inséré un fil métallique étamé de diamètre 1,5 mm dans les trous et l'ai maintenu en place à l'aide de colle époxy.

Ce type de fil est courant dans les magasins de bricolage, les lests plombés dans les magasins spécialisés dans les articles de pêche. Je ne suis pas pêcheur moi-même, et je me demande bien à quoi peuvent servir de tels lests, mais peu importe, vous les trouverez facilement. J'ai utilisé un poids d'une once (28 grammes) pour cette expérience.

Considérons maintenant que l'encodeur est enfermé dans un coffret contenant également le circuit que vous aurez réalisé. Supposons que quelqu'un tourne la boîte en tous sens de façon aléatoire. Pourquoi le ferait-il ? Eh bien, si vous installez un interrupteur de mise en marche du circuit au fond de cette boîte, la personne qui veut l'utiliser est obligée de la tourner pour le trouver. L'inertie du poids monté sur l'axe de l'encodeur fera tourner celui-ci qui s'arrêtera en une position que personne ne pourra connaître.

Supposons que nous disposions d'un second encodeur monté sur l'un des côtés de la boîte, à angle droit du premier, pour rendre le tout plus intéressant. De cette façon, la boîte réagira selon deux directions. Chaque encodeur générant deux sorties pouvant être interprétées comme valeur binaire de deux digits, soit 00, 01, 10 ou 11, nous pouvons combiner ces deux valeurs pour former un nombre sur 4 bits, variant entre 0000 et 1111 de façon totalement imprévisible. Nous pouvons alors envoyer cette information à l'entrée d'un circuit intégré décodeur ou sur les broches de contrôle d'un multiplexeur, pour obtenir un nombre aléatoire compris entre 0 et 15.

Il y a d'autres idées possibles ; d'ailleurs, j'en ai une.

Décideur rotatif

Vous pouvez réduire les quatre sorties des encodeurs en une seule, qui sera haute ou basse. Cela ressemblerait à un jeu de prise de décision, un peu comme une version plus stupide du *Yi Jing*. Pensez à une question, prenez la boîte entre vos mains, secouez-la, posez-la, appuyez sur un bouton qui allumera une LED Oui ou une LED Non.

L'une des raisons de l'attrait pour cette boîte est le ressenti des crans des encodeurs et des poids qui se déplacent quand on la secoue. On dirait que quelque chose de complexe et mystérieux se produit à l'intérieur. (Si quelqu'un vous le demande, vous pouvez lui répondre que c'est bien trop complexe et mystérieux pour pouvoir être expliqué.)

Vous vous demandez peut-être pourquoi deux encodeurs sont nécessaires, chacun créant quatre états possibles, alors que nous n'avons besoin que d'une réponse Oui ou Non. L'appareil doit être aussi imprévisible que possible, par conséquent, plus on utilise d'entrées, moins le résultat final sera prévisible. Mais comment réduire les quatre sorties en une seule ? En les

mixant à l'aide d'une porte XOR (OU exclusif). Observez le schéma de la fig. 33-7. Remarquez les quatre résistances de rappel vers la masse, qui permettent d'avoir en permanence un niveau défini en sortie des encodeurs.

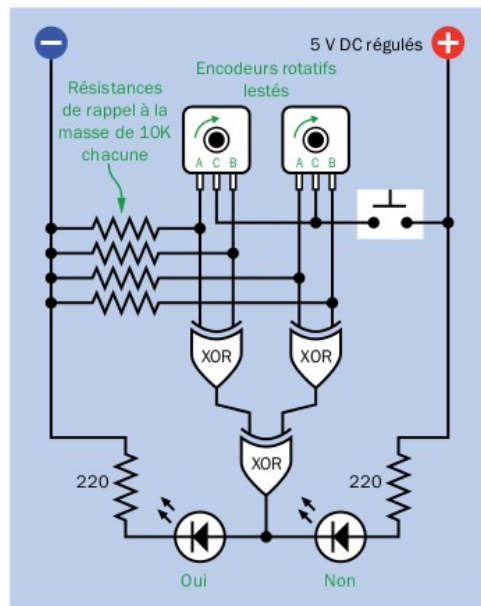


Figure 33-7. Ce circuit génère une réponse Oui ou Non de façon aléatoire, à partir de deux encodeurs rotatifs en quadrature.

En suivant la logique de ce circuit, vous constaterez que la sortie de la porte XOR du bas a autant de chances d'être à un niveau haut qu'à un niveau bas, pourvu que les encodeurs rotatifs se comportent équitablement.

L'absence d'interrupteur de mise en marche est l'un des aspects agréables de ce circuit. Les encodeurs ne consomment aucun courant, vous pouvez donc secouer la boîte et la reposer avant d'appuyer sur le bouton de mise en marche du circuit. Selon que la sortie de la porte XOR du bas est haute ou basse, l'interrupteur provoque l'alimentation de la LED Oui ou absorbe le courant traversant la LED Non. Souvenez-vous qu'un circuit logique de la famille 74HC00 peut absorber autant de courant qu'il peut en fournir.

Le schéma du circuit est représenté sur la fig. 33-8.

Pour ce circuit, vous devez utiliser un composant de la série HC. Il ne fonctionnerait pas avec les composants des séries plus anciennes qui ne fourniraient pas assez de puissance en sortie ou ne pourraient pas absorber suffisamment de courant.

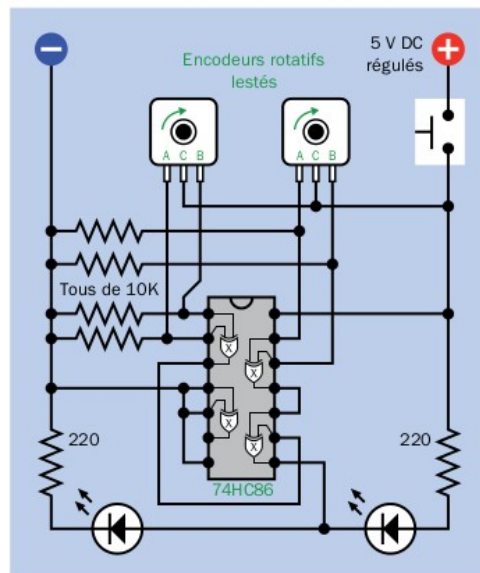


Figure 33-8. Schéma du décideur Oui/Non utilisant des encodeurs rotatifs.

Non-décodeur rotationnel

Une situation équivoque se produit quand vous ne vous voulez pas prendre de position. Les élus du peuple agissent ainsi de façon habituelle. Par exemple, si j'étais un élu et que quelqu'un me demande : « Est-il possible de modifier le décideur rotationnel afin qu'il devienne un non-décodeur rotationnel ? », je pourrais répondre : « Eh bien, il y a deux aspects à considérer : je pense que quelque chose doit être dit pour chacun d'eux, et le sujet pourrait demander une étude plus approfondie. ».

Comme je ne suis pas un élu, je ne répondrais pas cela. Je dirais « Oui, nous pouvons bien entendu créer un non-décodeur rotationnel ».

Le diagramme logique correspondant se trouve sur la fig. 33-9. Le circuit allume une LED Peut-être, si la porte XOR de gauche a sa sortie haute alors que celle de droite est au niveau bas. Il allume la LED Peut-être pas si les deux portes XOR ont le même niveau, soit bas, soit haut ? Dans ce cas, le troisième XOR aura sa sortie au niveau bas et absorbera du courant au travers de la LED indiquant « Je ne suis pas tout à fait sûr. »

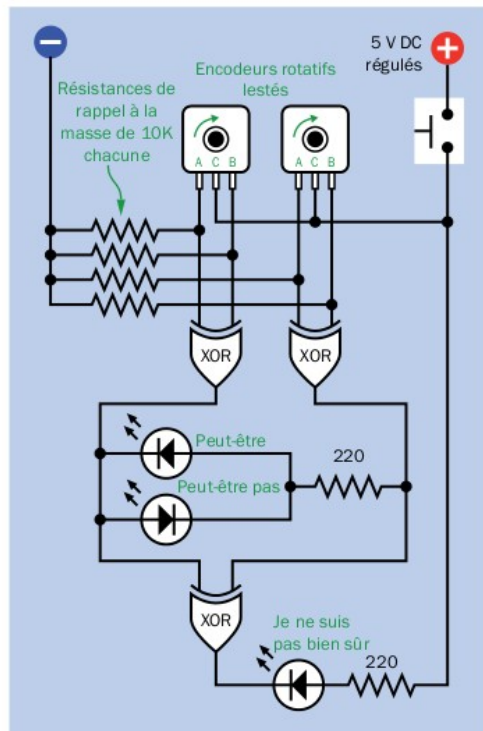


Figure 33-9. Le circuit Oui/Non précédent a été modifié afin de donner des réponses équivoques.

Le schéma du circuit est représenté sur la fig. 33-10, et la fig. 33-11 ci-contre montre la photo de sa réalisation. Sur la photo, les LED utilisées ont leurs propres résistances série. Les encodeurs rotatifs sont suffisamment éloignés l'un de l'autre pour permettre la rotation de leurs deux poids sans qu'ils se heurtent.

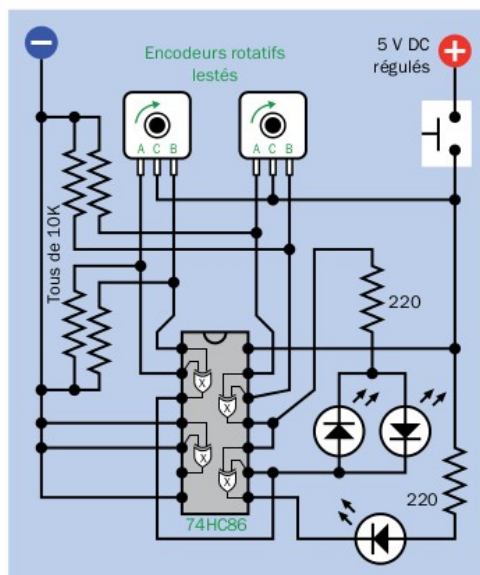


Figure 33-10. Le schéma du non-décideur rotationnel nécessite très peu de modifications par rapport à la version précédente du circuit Oui/Non.

Si vous suivez la logique de la fig. 33-9, vous verrez que la sortie « Pas sûr » apparaît deux fois plus fréquemment que les autres sorties. Cela permet à ce jeu d'être le plus inutilisable possible.

Si vous avez un ami dans la politique, vous pourriez lui offrir un de ces appareils comme contribution à sa campagne.

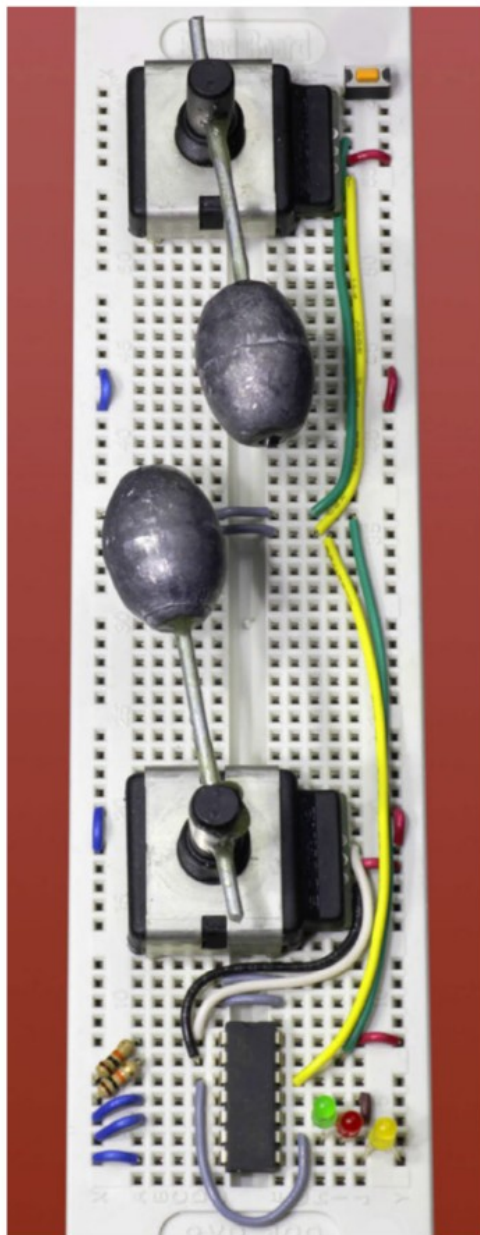


Figure 33-11. Version câblée du non-décideur rotationnel. Aucune résistance série n'est prévue pour les LED qui possèdent leurs propres résistances.

Hasard renforcé

Je me suis permis cette petite digression vers les encodeurs rotatifs, car je voulais inclure un projet facile au milieu des plus difficiles, et j'aime utiliser des composants pour des projets imprévus. Par ailleurs, j'apprécie l'idée d'un jouet qui ne nécessite qu'un circuit intégré, une paire de LED et un bouton-poussoir. Si vous y ajoutez un régulateur de tension de 5 V DC, vous pourrez l'alimenter par une pile de 9 V qui durera des années.

D'autres types de capteurs sont plus adéquats pour créer des conditions aléatoires. Dans la prochaine expérience, je vous suggérerai quelques alternatives, après quoi j'expliquerai comment obtenir un hasard parfait et approfondirai ce que cela signifie en réalité.

Dans cette expérience, je reviens sur le concept basique que j'ai déjà utilisé, consistant à choisir un nombre au hasard, en stoppant un temporisateur rapide à un instant arbitraire.

J'ai utilisé cette technique lors de l'expérience 28, pour le *Yi Jing* électronique, ainsi que dans l'expérience 21 de la fente magique. Ces deux jeux nécessitaient une action du joueur pour arrêter le timer. Ce que je vais décrire, maintenant, consiste, pour un capteur, à injecter une valeur aléatoire, sans aucune interaction de l'utilisateur.

Commençons par revoir le fonctionnement de base d'un timer monostable lent, qui démarre, puis stoppe, un temporisateur astable rapide, qui commande un compteur. J'utiliserai ce principe, dans toutes les applications suivantes, qui généreront des valeurs aléatoires, en utilisant des capteurs.

Ensuite, je ferai une pause, pour vous décrire comment un timer peut être câblé pour restreindre la séquence des nombres aléatoires générés. Au lieu de compter de 0 à 15, ou de 0 à 9, il pourrait compter jusqu'à n'importe quel nombre plus faible. Vous pourriez, même, le faire compter de 0 à 1.

Pour finir, je reviendrai aux capteurs.

Un timer commandé par un autre

Dans le circuit proposé sur la fig. 34-1 page suivante, le timer du haut est câblé de la même façon que celui de la fig. 27-1, afin de produire une impulsion unique et propre quand le bouton poussoir DPDT est activé.

La sortie du premier timer allume une LED (le petit rond jaune), simplement pour confirmer qu'il fonctionne. Il est également relié à la broche 4 de réinitialisation du second timer. Quand la broche de réinitialisation est au niveau haut, le timer peut fonctionner. Une sortie haute du premier timer permet donc au second timer de fonctionner (pour une durée limitée).

Le second timer génère un train d'impulsions transmis au compteur en anneau, et vous pourrez voir les LED numérotées de 0 à 9 s'allumer en séquence.

Quand le premier timer atteint la fin de son cycle, sa sortie force la broche de réinitialisation du second timer au niveau bas, stoppant son fonctionnement, et laissant une LED allumée.

Pressez le bouton de remise à zéro du compteur, appuyez ensuite sur le poussoir de redémarrage qui n'est pas protégé des rebonds, car, dans le cadre du test, vous devrez le relâcher avant que le cycle du timer lent ne soit terminé.

Vous devriez vous apercevoir qu'à chaque fin de cycle la même LED reste allumée. Aucun hasard ici, les composants se comportent comme nous l'avons souhaité, c'est-à-dire de façon cohérente.

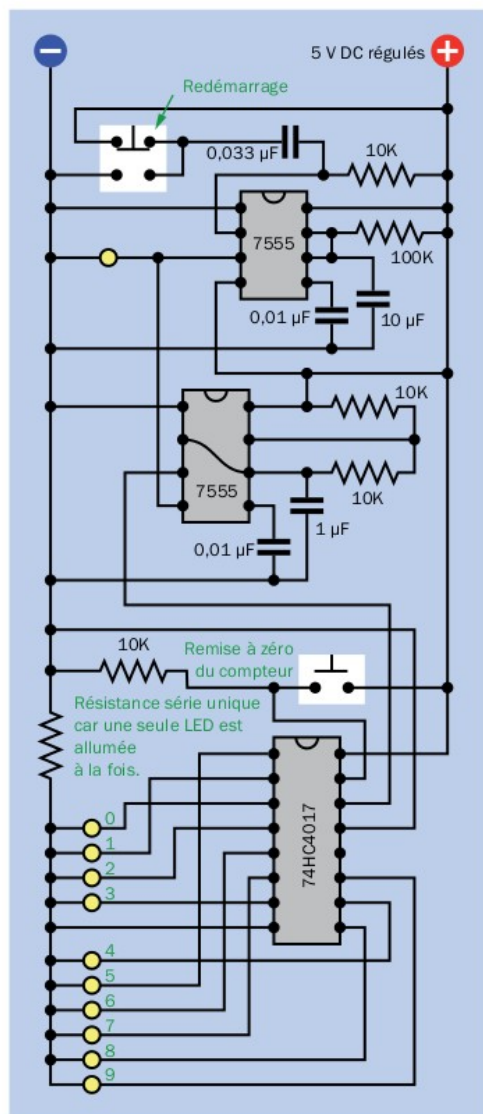


Figure 34-1. Ce circuit de base illustre le concept d'un timer lent autorisant le fonctionnement d'un timer rapide pendant une durée limitée. Le compteur en anneau, commandé par le timer rapide, s'arrêtera dans le même état à chaque fois, à condition que vous appuyiez sur le bouton de redémarrage avant chaque cycle.

Contrôle de la température

Rendons maintenant les choses un peu plus intéressantes, en utilisant une thermistance, qui est une résistance dont la valeur change en fonction de la température. La photo de l'une d'elles est présentée sur la fig. 34-2. Il s'agit d'un composant miniature, car plus il est petit, plus il réagit rapidement à un changement de température. En revanche, il dispose de fils de connexion assez longs : plus ils sont longs, moins ils conduisent la chaleur depuis ou vers la thermistance. Pour la même raison, ces fils sont très fins.

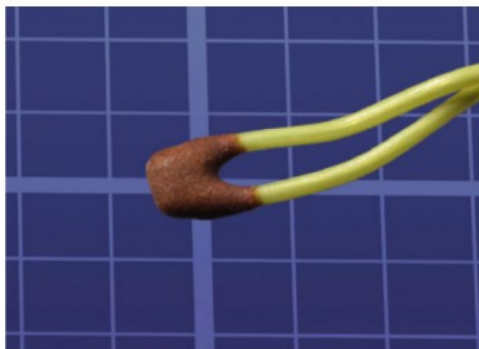


Figure 34-2 Thermistance de bonne qualité. Sa petite taille lui permet de réagir rapidement aux changements de température.

La thermistance que je souhaiterais que vous utilisiez aura une valeur de référence de 100K, pour une température de 25 °C. Une thermistance n'a pas de polarité, vous n'avez donc pas à vous soucier du sens de son branchement.

Pour l'utiliser dans notre circuit, mettez-la à la place de la résistance de 100K du premier timer.

Recommencez le cycle. Tant que la température ne change pas, celui-ci devrait se terminer en laissant toujours la même LED allumée, car le premier temporisateur délivrera toujours la même fenêtre de temps au second timer pour le comptage.

Exécutez le test plusieurs fois, sans oublier de remettre le compteur à zéro entre chaque test. Prenez, maintenant, la thermistance entre vos doigts, afin de la réchauffer. Recommencez le test. Le résultat est-il différent ?

Facteurs aléatoires

En plus du changement de la valeur de la thermistance, plusieurs autres facteurs peuvent influencer le résultat.

- Le comportement des circuits temporisateurs se modifie légèrement avec leur échauffement.
- Le bouton de redémarrage peut ne pas se comporter toujours de façon identique.
- La tension d'alimentation peut varier.
- Les liaisons sur la platine de montage ont une certaine résistance, qui peut varier si vous touchez des fils ou des composants.
- Il pourrait même y avoir d'autres facteurs ambiants auxquels je n'ai pas pensé.

Automatisation du circuit de randomisation

Nous pouvons accélérer le test en nous dispensant de l'interaction avec l'utilisateur.

La première étape consiste à changer le fonctionnement du premier timer, du mode monostable au mode astable. Il pourra s'activer pendant une seconde, puis marquer une pause d'une autre seconde, puis fonctionner à nouveau pendant une seconde, et ainsi de suite. De cette façon, vous pourrez vous asseoir et observer les résultats, au lieu de devoir constamment appuyer sur le poussoir de redémarrage. La fig. 34-3 montre le circuit modifié.

La seconde étape consiste à supprimer le bouton de remise à zéro du compteur et à faire en sorte qu'il se remette lui-même à zéro. La broche de réinitialisation du compteur 74HC4017 réagit au front montant d'une impulsion. La sortie du premier timer passe du niveau bas au niveau haut au début de chaque cycle, relierons-la alors à la broche de réinitialisation du compteur, à travers un condensateur, afin qu'elle passe momentanément au niveau haut.

J'ai également appliqué ce changement sur le schéma de la fig. 34-3. Vous trouverez la version câblée du circuit sur plaque de montage à la fig. 34-4 page suivante.

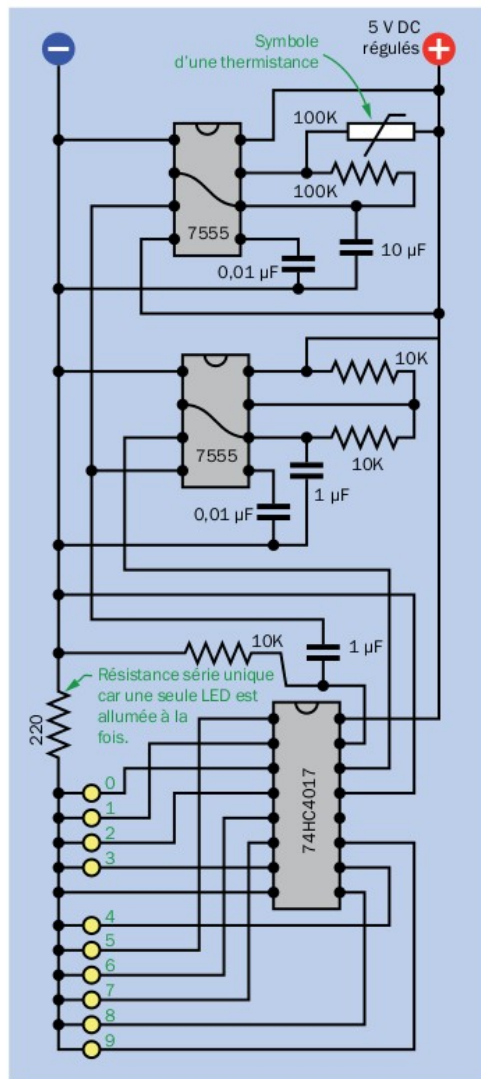


Figure 34-3. Modification de la précédente version du test de randomisation, pour éliminer l'action de l'utilisateur.

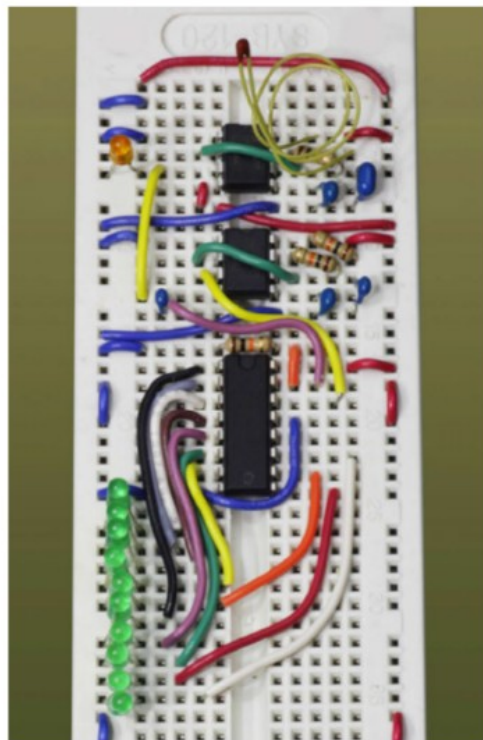


Figure 34-4. Le circuit de test utilisant une thermistance décrit dans cette expérience a été modifié afin de fonctionner de manière autonome sans intervention de l'utilisateur.

Le système devrait maintenant fonctionner seul.

Fondamentaux : limitation du comptage

Je dois mentionner un détail important avant de quitter le sujet du compteur en anneau.

Vous pouvez facilement modifier la plupart des compteurs afin qu'ils comptent jusqu'à un nombre inférieur à leur valeur maximale. Les compteurs en anneau ne font pas exception.

La broche 1 du compteur 74HC4017 passe au niveau haut, pour allumer la LED numéro 5. Qu'arrive-t-il, à

vos avis, si vous reliez la broche 1 et la broche 15, qui est la réinitialisation du compteur ?

Le compteur allumera successivement les LED 0, 1, 2, 3 et 4, comme d'habitude. Arrive alors un niveau haut sur la broche 1, supposé allumer la LED 5, et qui est transmis à la broche de réinitialisation. En une fraction de seconde, le compteur se réinitialise à la valeur 0 et remet sa broche 1 au niveau bas. En conséquence, la LED 5 ne pourra jamais s'allumer.

Le compteur compte à nouveau à partir de 0, tant qu'il reçoit les impulsions d'horloge. Il répétera ainsi indéfiniment sa séquence entre 0 et 4, ayant été modifié de compteur décimal en compteur semi-décimal.

Relier une sortie à l'entrée de réinitialisation est un procédé courant permettant de réduire la longueur du cycle d'un compteur.

C'est particulièrement facile dans le cas d'un compteur ayant des sorties décodées, car vous pouvez choisir n'importe quelle valeur pour interrompre le cycle de comptage. Quand un compteur avec des sorties de poids binaire est utilisé, différentes possibilités s'offrent à vous. Supposons, par exemple, que vous connectiez la troisième sortie binaire à l'entrée de réinitialisation. Cette sortie ayant un poids binaire de 4, le compteur redémarrera de lui-même, après avoir compté de 0 à 3. Comment faire si vous voulez que le compteur redémarré à la valeur de 6 ? C'est un peu plus difficile.

Vous pouvez résoudre ce problème en utilisant des portes logiques pour choisir la combinaison des sorties correspondant à la longueur du cycle de comptage souhaité. Une porte AND entre la seconde et la troisième sortie générera un niveau quand le compteur atteindra la valeur binaire 110, soit 6 en décimal. En reliant la sortie de la porte AND à la broche de réinitialisation, le circuit comptera de 000 à 101 (0 à 5 en valeurs décimales), avant de recommencer.

- Le bridage d'un compteur est une technique appréciable lorsque vous souhaitez qu'il choisisse un nombre au hasard, dans un intervalle inhabituel.
- Pour modifier un compteur 74HC4017 afin qu'il compte de 0 à 1 avant de recommencer, il suffit de mettre un fil de pontage entre la broche 4 (de valeur 2), et la broche de réinitialisation.

Revenons maintenant aux capteurs et à la randomisation.

Réglage de la vitesse

Si vous n'obtenez pas un écart important en sortie de votre compteur aléatoire, augmentez la vitesse du second timer. Une fréquence de 50 Hz est très faible, je l'ai choisie uniquement pour que vous puissiez voir les LED s'allumer en séquence. Retirez le condensateur de réglage de la durée, de 1 μF et remplacez-le par un condensateur de 0,1 μF pour obtenir une fréquence de 500 Hz. Ou utilisez un condensateur de 0,01 μF pour atteindre 5 000 Hz.

Plus le second timer fonctionnera vite, plus son état variera, du fait d'un faible changement de la durée de fonctionnement. J'explique cela sur la fig. 34-5.

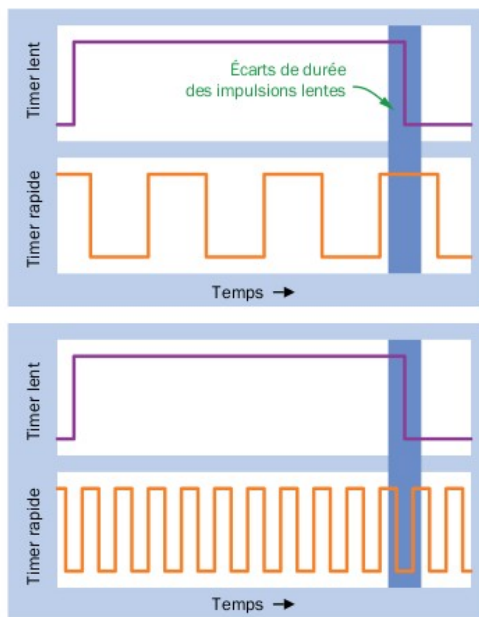


Figure 34-5. Quand un timer lent contrôle un second timer, les écarts de vitesse du timer lent (représentés par la bande bleue) provoqueront l'arrêt du second timer après un nombre d'impulsions variant plus largement, quand le second timer fonctionne plus rapidement.

Sur la moitié supérieure de la figure, la durée de l'impulsion du timer lent (en violet) peut varier selon les limites indiquées par le rectangle bleu, en raison de la variation de la valeur du capteur utilisé dans son circuit de temporisation. Du fait que le second timer (en orange) ne fonctionne pas très rapidement, sa sortie sera stoppée après le même nombre d'impulsions, au début, comme à la fin de la plage de fonctionnement du timer lent.

Dans l'autre moitié de la figure, le second timer fonctionne plus rapidement. En conséquence, il s'arrêtera sur deux impulsions possibles entre le début et la fin de la plage de fonctionnement du timer lent.

Si vous utilisez un condensateur de 1 nF pour générer une fréquence de 50 000 Hz, je parierais que le second compteur s'arrêtera presque à chaque fois sur une valeur différente, pour autant que vous puissiez me le dire.

Nous avons donc résolu notre problème en automatisant le comportement aléatoire des jeux pour les rendre totalement imprévisibles. Oui, peut-être.

Je voudrais, tout d'abord, aller un peu plus loin en ce qui concerne les thermistances.

En bref: les thermistances

Les thermistances modifient leur valeur en réponse à une variation de température. La valeur d'une thermistance de type CTN diminue quand la température augmente. Sa variation est linéaire sur une plage assez large, approximativement entre -40 °C, et +125 °C. Le type CTP (Coefficient de température positif), accroît sa valeur presque subitement quand sa température augmente.

CTN représente Coefficient de température négatif, et CTP symbolise Coefficient de température positif. Le type CTP est souvent utilisé comme fusible, permettant de bloquer le courant d'une alimentation quand la température dépasse une valeur maximale.

Ici, nous utiliserons le type CTN.

Les thermistances sont peu coûteuses, la plupart revenant à moins de 50 centimes d'euro. Elles sont disponibles selon une grande gamme de valeurs de base, habituellement définies pour une température de 25 degrés Celsius.

Pour tester une thermistance, configurez votre multimètre pour la mesure des résistances en kilohms et reliez les pointes de touche aux fils de la thermistance. Ne la touchez pas avec vos doigts, cela modifierait non seulement sa température, mais aussi la valeur mesurée. Placez la thermistance sur une surface isolante ferme et appuyez les pointes de touche fermement sur les fils, attendez ensuite que la lecture se stabilise.

Approchez maintenant votre autre main de la thermistance, sans la toucher pour ne pas modifier la mesure. Vous devriez alors constater une lente modification de la valeur de la thermistance, au fur et à mesure qu'elle perçoit la chaleur de votre peau. Les thermistances miniatures réagiront plus rapidement que les plus grosses, car elles ont une masse moins importante à chauffer ou refroidir.

Rendre une thermistance plus aléatoire

De nombreux facteurs peuvent modifier la température autour d'un circuit, mais ce dernier génère lui-même de la chaleur. Disposez par exemple une thermistance à l'intérieur d'une boîte avec votre circuit. Pour la perturber davantage, collez-la contre une résistance de 220 ohms câblée entre la masse et le pôle positif de l'alimentation. La résistance consommerait une puissance d'environ 100 mW pour 5 V DC, largement inférieure à sa puissance nominale de fonctionnement d'1/4 W, mais suffisante pour provoquer un petit échauffement. Cela n'est évidemment pas une très bonne idée si votre circuit est alimenté par une pile. Prenez également garde à ne pas pousser la thermistance à la limite de sa gamme de fonctionnement, car elle ne répondrait plus alors aux variations de température. C'est donc à éviter.

Placez la thermistance de façon à ce qu'elle soit exposée à l'air ambiant, au dos de la boîte par exemple, où elle réagirait aux variations de la température ambiante. Mieux encore, utilisez deux thermistances reliées en série ou en parallèle, l'une dans la boîte, l'autre à l'extérieur.

Si cela n'est pas assez aléatoire pour vous, vous préférerez probablement, quelque chose de plus exotique.

Le capteur d'humidité

L'humidité d'une pièce change relativement lentement, à moins que la cuisine ou la salle de bain soit à proxi-

mité. Cependant, vous pourriez prendre en compte ces changements lents dans le circuit de contrôle de votre timer.

Le capteur d'humidité Humirel HS1011 se trouve facilement pour moins de dix euros. Il n'a que deux fils, sa capacité varie en fonction du degré d'humidité.

Oui, sa capacité. Il s'agit d'un nouveau concept. Comment pourriez-vous l'utiliser dans le circuit de commande du timer ?

Simplement en le branchant à la place du condensateur de timing du premier temporisateur, dans le schéma de la fig. 34-4. La fiche technique du fabricant Humirel précise que la capacité du capteur varie entre 177 pF et 188 pF. C'est une faible valeur, nous devons donc utiliser une résistance de contrôle de la durée qui soit plus élevée.

Contrôle de l'humidité

Le capteur d'humidité pourrait potentiellement être utilisé pour mettre un humidificateur en marche, ou l'arrêter, si vous souhaitez une atmosphère à humidité contrôlée. Les livres, les papiers, les anciennes bandes magnétiques audiophoniques et les sinus de l'homme, se comportent mieux lorsque le taux d'humidité de l'air est contrôlé.

Pour y parvenir, il suffirait d'utiliser la variation de capacité du capteur pour modifier la vitesse de fonctionnement d'un multivibrateur (timer en mode astable), un second timer l'activant brièvement. La sortie du multivibrateur serait reliée à un compteur à quatre bits. Celui-ci serait lui-même relié à un multiplexeur à quatre bits dont les seize broches d'entrées/sorties seraient connectées en série, formant un grand pont diviseur. La tension délivrée par le multiplexeur serait appliquée à l'entrée d'un comparateur. La tension de référence du comparateur serait ajustée à l'aide d'un potentiomètre permettant de régler le taux d'humidité. La sortie du comparateur, reliée à un relais, commanderait le fonctionnement de l'humidificateur.

Est-ce suffisamment compliqué pour vous ? Cela semble être un projet nécessitant, au minimum, une journée entière pour tout faire fonctionner correctement. Vous choisirez peut-être d'acheter directement un hygrostat fonctionnant comme un thermostat. Mais ça serait bien ennuyeux ! Ne préférez-vous pas prendre la peine de construire votre propre version et profiter du plaisir de

le voir fonctionner, puis du regard perplexe de vos amis qui ne comprendraient pas le divertissement de réaliser des gadgets non nécessaires ?

Personnellement, je préférerais nettement le cycle effort, plaisir, perplexité.

Je dois maintenant passer à l'étude d'un autre capteur.

L'accéléromètre

J'ai écrit un article traitant des accéléromètres dans le magazine *Make*. Ils deviennent de moins en moins chers. Étant donné qu'ils réagissent à une force de n'importe quelle orientation, ils peuvent déterminer dans quel sens ils sont placés en mesurant la force de gravité. Si vous possédez un appareil portable, un accéléromètre fera varier sa résistance de sortie, selon la façon dont vous le tenez. Voici donc un autre moyen d'obtenir une résistance de valeur aléatoire.

Un accéléromètre est un composant miniature monté en surface, souvent présent sur un petit circuit imprimé de test, comme celui de la fig. 34-6. Cette présentation le rend facile à utiliser.

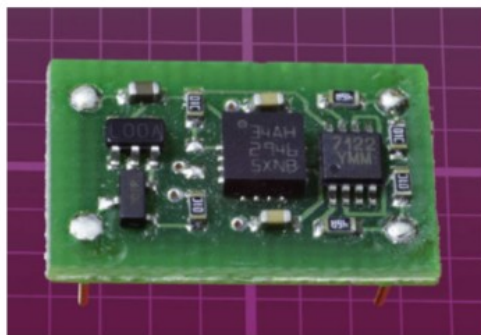


Figure 34-6. Accéléromètre monté en surface sur une platine de test. L'accéléromètre mesure une force quelconque, y compris la force de gravité. En conséquence, sa sortie varie selon la direction dans laquelle vous le tenez. Sa sortie est convertie en une valeur de résistance entre des bornes de la platine. Les carrés du fond mesurent $2,54 \times 2,54$ mm.

Le capteur tactile

Celui-ci est, je crois, le plus prometteur de tous les capteurs. Il ressemble à un petit sandwich de feuilles en

plastique flexibles, séparées par une résistance sensible à la pression.

Vous trouverez une photo de ce capteur sur la fig. 34-7. Je ne suis pas sûr de la façon dont il fonctionne, mais il paraît fiable, et offre une large gamme de valeurs de résistance. Quand vous ne le touchez pas, sa résistance est pratiquement infinie. Si vous appuyez fort, sa résistance chute aux environs de 1K.

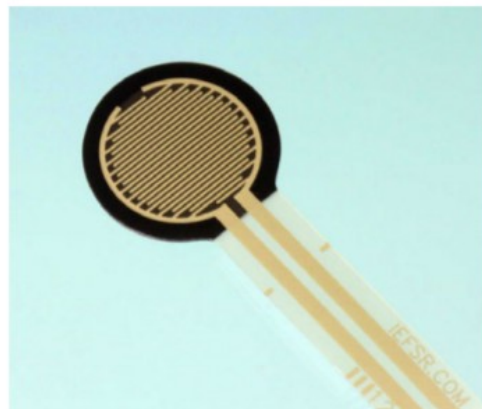


Figure 34-7. Capteur tactile dont la résistance change selon la pression exercée par votre doigt.

Vous pourriez l'utiliser pour remplacer un bouton-poussoir qui démarrerait un timer. En d'autres termes, un capteur sensible peut remplir le double rôle de générateur d'une valeur de résistance aléatoire et d'interrupteur de haute technologie. Sa très large gamme de valeurs de résistance est en mesure d'assurer une randomisation aussi importante.

Mais je reconnais que j'é mets des suppositions à ce sujet. Je n'ai pas eu le temps de vérifier plusieurs milliers de fois s'il générerait réellement une grande diversité de valeurs. Et même si j'avais le temps, la façon dont je touche le capteur pourrait créer plus ou moins de résistance. En outre, il suffirait qu'une autre personne le touche de manière insistante pour que le résultat ne soit plus vraiment aléatoire.

Je crois que je douterai longtemps des possibilités de ces composants et continuerai à dire « Et si ceci » et « Et si cela ».

J'admetts que j'ai tendance à être sceptique, mais le vrai problème vient du fait que j'ai réalisé ces expériences à partir d'une *base empirique*.

Les problèmes de l'empirisme

Une étude « empirique » signifie que les résultats sont établis selon l'observation ou l'expérience.

Qu'y a-t-il de mauvais en cela ? C'est certainement mieux que de tourner autour en se demandant ce qui pourrait bien se passer.

C'est vrai, le travail expérimental est plus valorisant que d'établir de vagues prédictions sur ce qui pourrait arriver. (En réalité, c'est l'objectif même de ce livre.) La plupart des chercheurs confirme leurs conclusions grâce à l'expérience et l'observation. Il ne faut pas pour autant écarter un autre aspect de la recherche, la base théorique.

Par exemple, les astronomes n'ont pas déterminé avec précision la position de la planète Mercure lorsqu'elle disparaît d'un côté du soleil, puis réapparaît de l'autre côté, simplement parce qu'ils avaient du temps libre et voulaient contrôler leurs équipements. La théorie de la relativité d'Einstein avait prévu que la gravité solaire courberait la lumière réfléchi par Mercure. Les scientifiques ont réalisé leurs observations, pour vérifier si c'était exact. (En fait, c'était bien exact.)

En revanche, si vous n'avez pas une base théorique et que vous espérez que vos observations du jour reproduisent les mêmes résultats le lendemain, rien ne le garantit, en particulier s'il existe de nombreux facteurs hors contrôle, par exemple le fait que des personnes appuient différemment sur un capteur sensible.

Vous pourriez estimer qu'une thermistance, un capteur d'humidité, un accéléromètre ou un capteur de pression se comportent de la même façon avec différents utilisateurs, créant ainsi un large spectre de valeurs aléatoires, mais vous ne pouvez pas en être certain.

Le résultat semble être aléatoire aujourd'hui, et je ne vois pas pourquoi il ne le serait pas demain. Mais je suis dans l'incapacité de le prouver.

Ceci étant, et si je vous avais dit que vous étiez capable de câbler quelques composants, qui généreraient d'eux-mêmes une suite de nombres aléatoires, sans

aucune intervention extérieure ? Et si vous pouviez certifier mathématiquement que cette séquence de nombres serait à chaque fois identique ? Et si pour cette suite, tout esprit humain pouvait à chaque fois prédire le nombre suivant ?

Cela ressemble tout à fait à un générateur de nombres pseudo-aléatoires, tant que vous ne débutez pas la séquence au même endroit. Mais cela paraît compliqué, et vous pourriez vous demander si c'est bien nécessaire.

Ce n'est pas très compliqué. Est-ce nécessaire ou non, cela dépend de ce que vous voulez en faire.

L'aléatoire est-il aléatoire ?

Dans un jeu électronique classique, nous avons simplement besoin d'une entrée qui semble aléatoire. Si nous générons des nombres arbitrairement entre 0 et 15, et que le nombre 13 sorte un peu plus souvent que les autres au cours de centaines de tirages, ce n'est probablement pas très important.

Dans le jeu de la fente magique, le joueur qui joue en second peut espérer faire un profit de 12,5 %. En supposant que le générateur de nombres aléatoires choisisse une fente 0,5 % plus souvent qu'une autre, ce n'est probablement pas très important.

En revanche, dans certaines expériences, il est nécessaire d'avoir des nombres uniformément pondérés. Si nous générons aléatoirement une suite de uns et de zéros durant une longue période de temps, nous devons être absolument sûrs que la série contiendra 50 % de uns et 50 % de zéros, et non un rapport de 50,1 % à 49,9 %.

Vous pensez peut-être qu'une telle précision n'est pas nécessaire. Mais revenez au test de télépathie de l'expérience 15. Supposez que ce test pour deux personnes soit un test pour une seule personne.

Le défi, pour quelqu'un utilisant sa puissance psychique (si cela existe), serait de deviner si une LED est allumée ou éteinte. Un circuit allumerait ou éteindrait la LED selon une séquence apparemment aléatoire, mais, après 254 essais, vous devriez être absolument certain que la LED aura été allumée 127 fois et éteinte le même nombre de fois. Dans le cas contraire, si la personne parvient à deviner correctement dans un peu plus que la moitié des cas, vous ne sauriez pas comment évaluer sa performance.

Dans toute étude paranormale, la moindre variation autour d'un point d'équilibre peut être significative. Par conséquent, si un nombre est généré plus souvent qu'un autre, cela devient un vrai problème.

Pourrions-nous créer une version du test de télépathie à un seul joueur qui fournisse un résultat probant ? Je pense que cela n'est pas trop difficile, je vais m'y risquer.

Je vais aborder ce défi en deux étapes. Tout d'abord, je vous montrerai comment créer un générateur de nombres pseudo-aléatoires parfait. Ensuite, je l'incorporerai dans le test.

Le registre à décalage à rétroaction linéaire

Expérience

35

Supposons qu'une boîte noire contienne une sorte de circuit générant une suite de nombres sans subir aucune influence du milieu extérieur. Comment pouvons-nous déterminer si la suite est aléatoire ? Pour cela, je pense qu'elle doit satisfaire deux conditions.

- La suite doit être relativement incapable de se répéter. Je dis relativement, car tout générateur autonome de nombres se répète de lui-même si nous lui laissons assez de temps pour cela. L'objectif est de créer une séquence si longue ou si complexe qu'elle dépasse les possibilités de mémoire ou de concentration humaine. (Je considère que le générateur de nombres est basé sur un système physique suffisamment grand pour ne pas être influencé par l'effet quantique.)
- Si nous pouvons spécifier un ensemble de nombres qui ont une même probabilité de sortir, ils doivent être uniformément pondérés afin d'avoir tous la même chance d'apparaître dans la séquence et aucune valeur ne sera omise.

Il existe un circuit qui peut presque satisfaire les deux conditions. Il s'agit d'un registre à décalage à rétroaction linéaire, ou LFSR (*Linear Feedback Shift Register*). Sa séquence de sortie peut être de n'importe quelle longueur (ou presque), et sa sortie est uniformément pondérée (ou presque). Après avoir réalisé ce circuit, je vous montrerai comment rendre ces « presque » suffisamment peu importants pour être ignorés.

Connaître votre LFSR

Commençons par le circuit de test de la fig. 35-1. Il ressemble beaucoup au circuit de test du registre à décalage de la fig. 27-2.

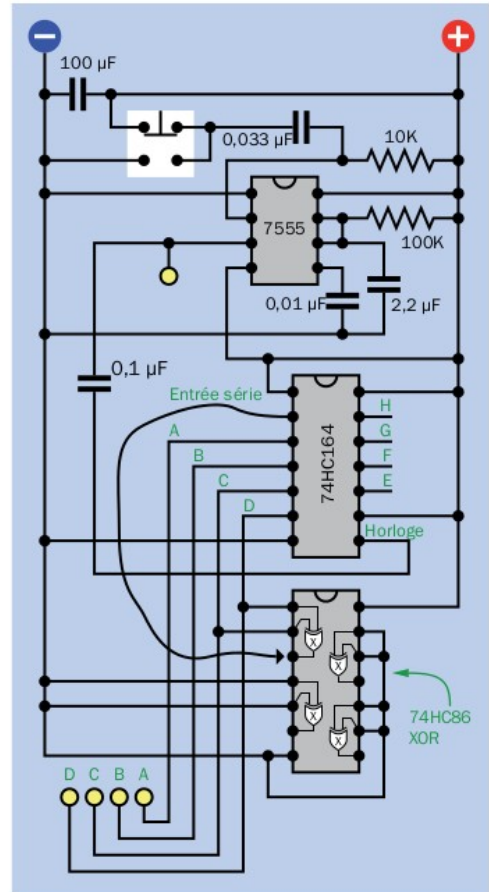


Figure 35-1. Circuit de test simplifié permettant de démontrer le fonctionnement d'un registre à décalage à rétroaction linéaire (LFSR). Les liaisons à la masse des LED ne sont pas représentées et une résistance série doit être ajoutée à chaque LED qui n'en comporterait pas à l'intérieur.

Toutefois, l'interrupteur d'entrée des données n'est pas présent, car ce circuit génère ses propres données en les recyclant. Les sorties des emplacements mémoire E, F, G et H n'ont pas été reliées, car le fonctionnement du circuit sera plus compréhensible en n'utilisant que A, B, C et D. Ce sera également plus facile si vous alignez les LED préconisées (représentées par des petits ronds jaunes en bas à gauche). Leurs fils reliés au circuit intégré ne peuvent bien entendu pas se situer sur la même rangée de la plaque de montage car elles doivent être alimentées séparément. En revanche, vous pouvez plier leurs fils afin de les aligner.

La fig. 35-2 montre une photo du circuit réalisé sur une plaque de montage.

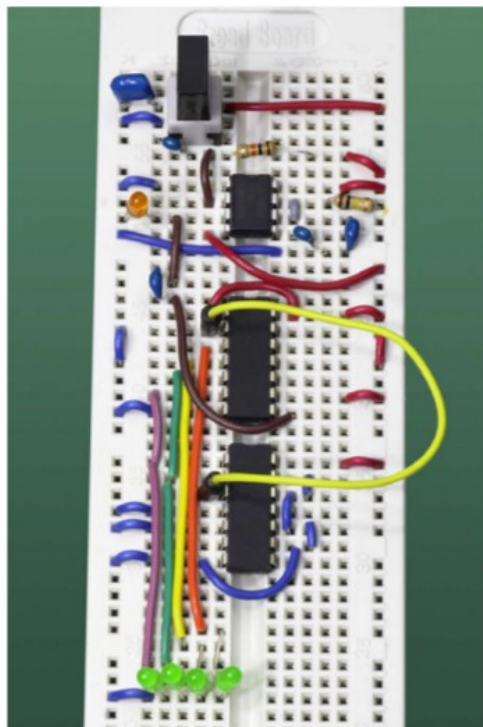


Figure 35-2. Circuit de test du registre à décalage à rétroaction linéaire.

Au lieu d'une entrée manuelle des données, nous avons maintenant une porte XOR, dont les entrées sont reliées aux sorties des emplacements mémoire C et D, et dont

la sortie commande l'entrée des données en série du registre à décalage.

J'ai représenté cette liaison par une ligne ondulée indiquant un fil de pontage flexible du type ayant deux petits plots aux extrémités. Au départ, les deux extrémités de ce fil sont connectées.

Les états des sorties C et D sont recyclés. Si vous appliquez une alimentation propre au registre à décalage, le problème est que ses emplacements mémoire sont vides (au niveau bas). Quand la porte XOR a ses entrées au niveau bas, sa sortie est également au niveau bas. En conséquence, le bouclage ne produit aucun résultat. Les niveaux bas seront recyclés indéfiniment et les LED resteront éteintes.

Fréquemment, quand on applique la tension d'alimentation à un circuit, on constate une surtension initiale ou un bruit dans l'alimentation qui peut générer des états aléatoires dans le registre à décalage. Le condensateur de 100 μ F du schéma est prévu pour que cela n'arrive pas, bien que cela ne soit pas toujours totalement efficace.

Si vous obtenez initialement des valeurs aléatoires, certaines LED s'allumeront.

Que cela se produise ou non, je souhaite charger la totalité du registre avec des niveaux hauts. Pour ce faire, débranchez la connexion basse du fil de pontage de la sortie de la porte XOR et connectez-la au pôle positif de l'alimentation pour que l'entrée série du registre à décalage soit au niveau haut. Appuyez maintenant quatre fois sur le poussoir pour charger les emplacements mémoire A, B, C et D.

Parfait, quand les quatre LED sont allumées, reconnectez le fil de pontage à la broche 3 du circuit intégré XOR. Appuyez ensuite seize fois sur le poussoir, vous devriez alors observer une séquence identique à celle de la fig. 35-3. Elle se répétera après quinze pas, et si vous changez le mode monostable du timer en mode astable, vous verrez la séquence se reproduire d'elle-même.

En bref : au sujet du registre à décalage à rétroaction linéaire

Résumons ce que vous venez d'apprendre.

- Si les LED affichent des états bas correspondant à la valeur binaire 0000, elles resteront à cet état car le LFSR ne fait circuler que des zéros.

- Si les LED affichent une valeur différente de 0000, elles devraient suivre un cycle de quinze combinaisons distinctes avant de recommencer. Toutes les valeurs de 0001 à 1111 apparaîtront, mais pas en ordre numérique. Aucune valeur ne sera omise (à part 0000), et aucune valeur ne réapparaîtra avant que la séquence ne soit terminée.

La difficulté vient du fait de la brièveté de cette séquence, qui permet au cerveau humain de s'apercevoir qu'elle se répète.

Peut-être qu'en utilisant huit positions mémoire du registre à décalage et huit LED, cela offrira une plus grande variété de combinaisons et il faudra plus de temps avant que la répétition ne se produise. Ça paraît plausible, mais avant de le mettre en œuvre, je veux vous montrer ce qui se passe exactement.

Observez de près le décalage de bits

Sur la fig. 35-3, les rectangles rouges en haut représentent les emplacements mémoire du registre à décalage. Sur cette figure, le décalage se produit de droite à gauche, comme les lettres A, B, C et D le suggèrent. Si vous étudiez ce sujet par ailleurs, vous trouverez parfois que les bits sont décalés de gauche à droite. Je ne veux pas en faire autant, car je vais utiliser les sorties du registre à décalage pour représenter un nombre binaire. Le décalage des bits de la droite vers la gauche est plus naturel dans ce contexte.

Rappelez-vous comment fonctionne un registre à décalage. Les données d'entrée sont stockées dans un tampon jusqu'à ce qu'une impulsion d'horloge décale l'ensemble des données, afin de libérer un emplacement. Ainsi, lorsqu'on applique les états des sorties C et D aux entrées de la porte XOR qui les transmet à l'entrée des données du registre à décalage, elles restent dans le tampon, jusqu'à ce que la prochaine impulsion d'horloge les synchronise. Ensuite, les nouvelles données des emplacements C et D sont appliquées en entrée de la porte XOR, dont la sortie charge le tampon d'entrée du registre, jusqu'à la prochaine impulsion d'horloge, et ainsi de suite.

Si on affecte les poids binaires 8, 4, 2 et 1 aux emplacements mémoire (de gauche à droite), leur valeur décimale initiale équivaut à $8 + 4 + 2 + 1 = 15$. Toutefois, la valeur réinjectée par la porte XOR change le bit le plus à droite de la valeur 0 car la porte XOR reçoit deux entrées hautes, produisant toujours un niveau bas en sortie. Sur la deuxième ligne, les emplacements mémoire totalise-

ront $8 + 4 + 2 = 14$. Sur chaque ligne de cette figure, la valeur décimale totale est indiquée en chiffres noirs dans un rectangle blanc.

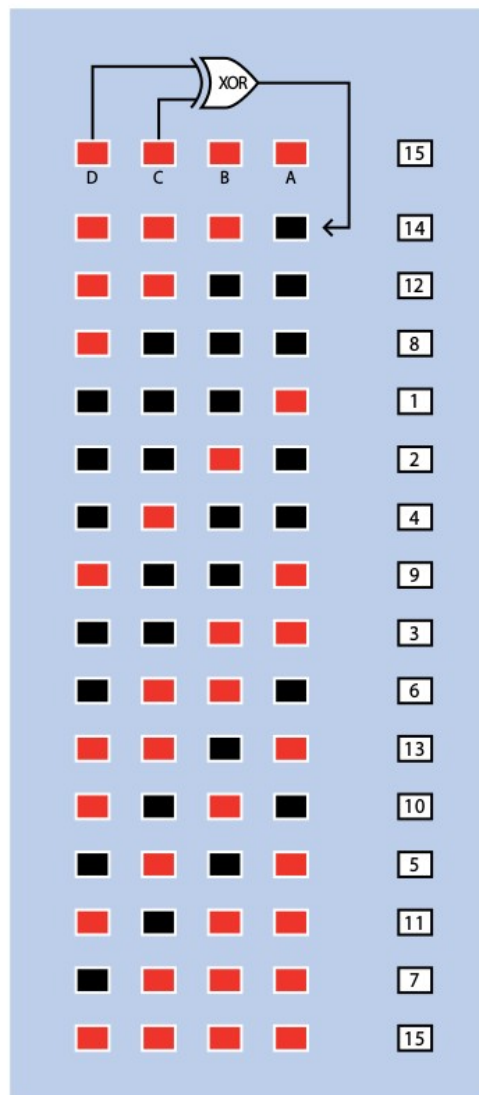


Figure 35-3. Comportement d'un registre à décalage linéaire à quatre bits.

Le problème des zéros

Pour traiter le problème du registre à décalage à rétroaction linéaire qui ne réagit pas lorsque ses positions mémoire sont initialisées avec des niveaux bas, tous les documents suggéreront de le charger avec d'autres niveaux. Cela serait possible à l'aide d'un composant qui activerait brièvement l'entrée horloge tout en maintenant l'entrée des données au niveau haut. Mais je préférerais l'éviter.

Il existe une solution plus facile : modifier le circuit en remplaçant la porte XOR par une porte XNOR. Les circuits XNOR ne sont pas utilisés fréquemment, mais vous pouvez les trouver facilement dans les séries 74HC00 ou 4000B. (Une autre alternative serait d'inverser la sortie de la porte XOR, mais cela nécessiterait l'ajout d'une porte inverseuse.)

Revenez sur la fig. 15-5 de l'expérience 15, où je montrais que la sortie d'une porte XNOR est l'inverse de celle d'une porte XOR. Elle réagit à la présence de deux entrées au niveau bas, en délivrant une sortie de niveau haut. Elle permet donc un fonctionnement correct du registre LFSR, même si celui-ci part d'une valeur 0000.

La séquence résultant de l'utilisation d'une porte XNOR au lieu d'une porte XOR est présentée sur la fig. 35-4. Elle comprend toutes les valeurs binaires de 0000 à 1110 (0 à 14 en valeurs décimales). En observant le circuit utilisant la porte XNOR, vous verrez que celui-ci serait bloqué par une valeur 1111, tout comme le précédent se bloquait pour une valeur initiale de 0000. La porte XNOR élimine la valeur 1111 au lieu de la valeur 0000. Le circuit démarre donc automatiquement quand la tension d'alimentation lui est appliquée.

La nécessité de non-répétition

Avant de reconstruire le circuit en utilisant un circuit intégré quadruple porte XNOR à deux entrées, je dois revenir sur la problématique de la répétition. Nous avons réellement besoin de plus de quinze pas avant la répétition de la séquence.

Si nous utilisons les huit positions mémoire du registre, les valeurs de sortie s'échelonnent de 00000000 à 11111110 en binaire (0 à 254 en valeurs décimales), et 255 pas sont nécessaires avant que la séquence ne se reproduise.

Cela paraît plus intéressant, mais où doit-on placer la porte XNOR afin d'assurer un fonctionnement correct ?

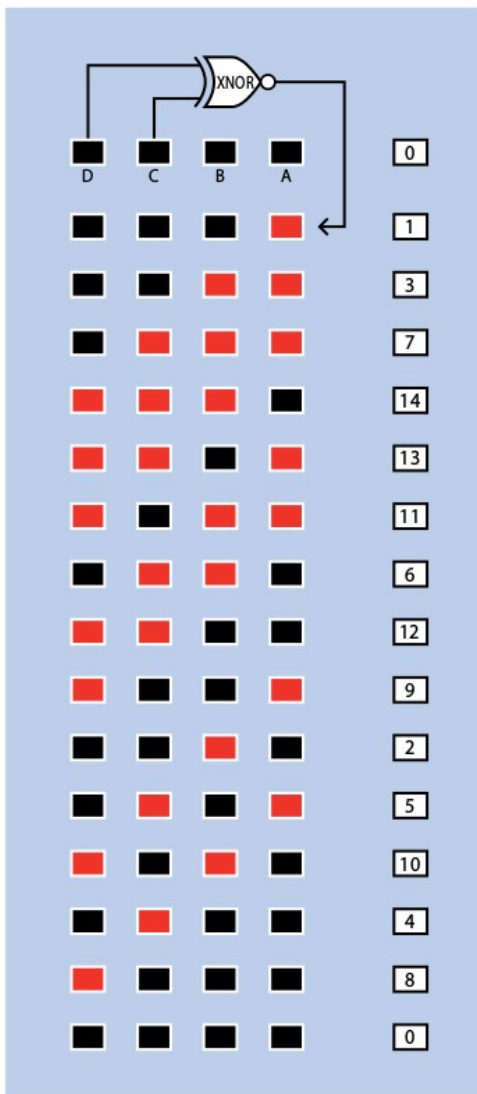


Figure 35-4. Séquence des données du registre à décalage à rétroaction linéaire utilisant une porte XNOR pour traiter quatre bits initialement à la valeur 0000.

Le résultat sera-t-il correct en reliant simplement ses entrées aux sorties G et H du registre et en connectant sa sortie à l'entrée des données ?

Non, si vous essayez, vous constaterez que cela ne fonctionne pas. Maintenant que nous décalons huit bits, trois portes XNOR reliées comme sur la fig. 35-5 sont nécessaires. (Les emplacements des portes seraient les mêmes dans le cas de l'utilisation de portes XOR. La seule différence serait l'impossibilité de démarrer le fonctionnement du registre à décalage à partir d'une valeur initiale ne contenant que des zéros.)

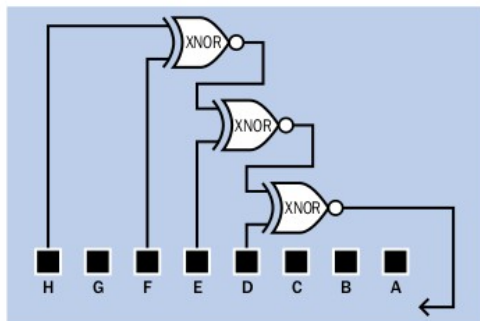


Figure 35-5. Trois portes XNOR sont requises pour réaliser un registre à décalage à rétroaction linéaire de huit bits.

Pourquoi faut-il trois portes XNOR, et pourquoi sont-elles reliées ainsi, de cette façon particulière ?

En fait, si nous en avons moins, ou plus, ou si elles étaient reliées différemment, le circuit ne générerait probablement pas une séquence comprenant toutes les valeurs de 0 à 254, sans aucune omission, et sans répétition. Mais comment je le sais ?

Il est possible de le démontrer mathématiquement, mais ce n'est pas simple. Cela nous entraînerait dans des domaines tels que les « primitives polynomiales » ou les calculs sur les « éléments finis » qui sont très difficiles à comprendre et nécessiteraient de nombreuses pages d'explications, même si j'étais qualifié pour les expliquer.

Si je ne suis pas en mesure de le prouver, comment puis-je en être certain ?

Je peux y répondre en vérifiant la théorie par l'observation. Le schéma du circuit reproduisant la logique de la rétroaction linéaire de la fig. 35-5, se trouve sur la fig. 35-6. Il est facile à suivre.

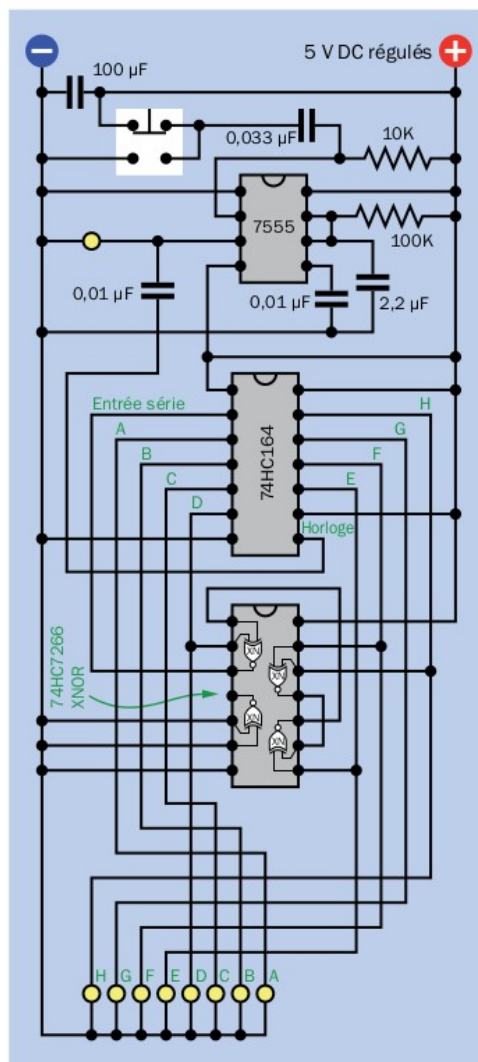
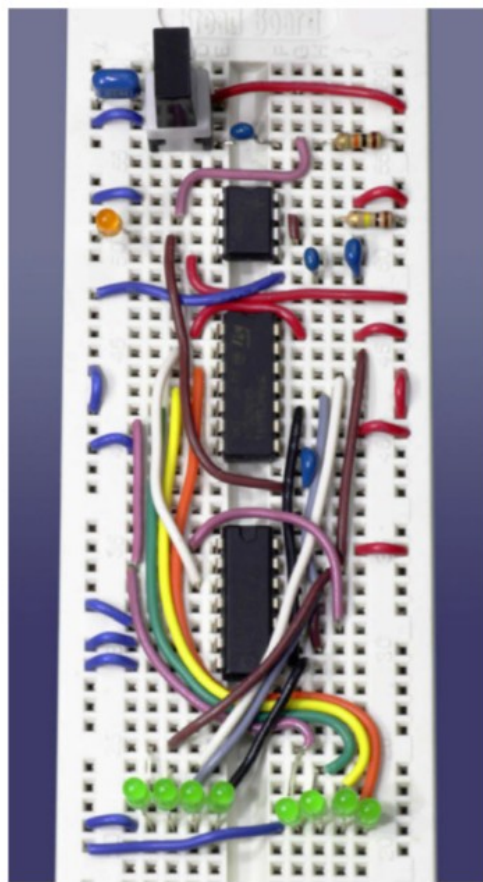


Figure 35-6. Schéma de test d'un registre à décalage à rétroaction linéaire de 8 bits. Les connexions à la masse des LED ne sont pas indiquées. Une résistance série doit être ajoutée à chaque LED n'en comportant pas une intégrée.

Les sorties H et F du registre sont reliées aux entrées de la porte XNOR en haut et à droite du circuit intégré 74HC7266. La sortie de cette porte est reliée à l'une des entrées de la porte située en dessous, dont la seconde entrée est reliée à la sortie E. La sortie de cette porte est reliée à une entrée de la porte en haut et à gauche qui reçoit la sortie D sur sa deuxième entrée et dont la sortie est connectée à l'entrée série des données.

En haut du schéma se trouve un interrupteur muni d'un circuit antirebond, qui vous permet de parcourir la séquence à votre guise.

La version câblée de ce circuit sur une platine de montage est représentée sur la fig. 35-7.



Attention : singularité des portes XNOR

Prenez garde à câbler correctement le circuit intégré XNOR. Ses connexions internes sont totalement différentes de celles de tous les autres circuits intégrés. Pour votre information, son brochage est exposé sur la fig. 35-8. Si vous commettez l'erreur de le câbler comme des portes OR ou XOR, vous pourriez l'endommager définitivement.

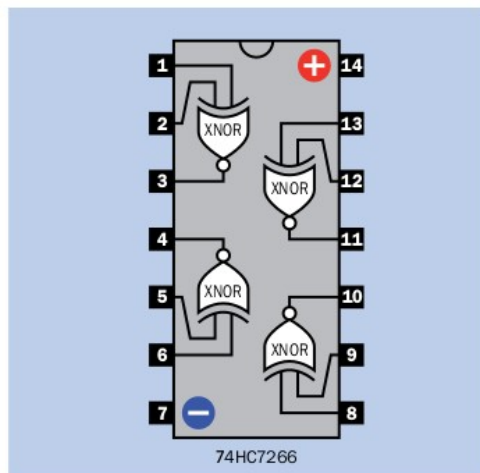


Figure 35-8. Brochage du circuit intégré à quadruples portes XNOR à deux entrées. Les connexions internes de ce composant sont différentes de celles des autres circuits intégrés contenant des portes logiques.

Une autre point à vérifier concerne le fait qu'il existe un circuit intégré contenant des portes XNOR, dont la référence est 74HC266, peu différente de celle du 74HC7266, dont les sorties sont prévues pour délivrer un courant pouvant atteindre 100 mA, mais qui ne peut pas être connecté à d'autres circuits intégrés. Le circuit intégré Texas Instruments SN74HC266 en est un exemple. Faites attention à ne pas l'acheter par erreur !

Figure 35-7. Câblage du registre à décalage à rétroaction linéaire de 8 bits, sur une plaque de montage.

Procurez-vous le circuit intégré 74HC7266, un peu plus cher que les autres circuits logiques. Vous pouvez aussi utiliser le 4077 (de l'ancienne génération CMOS) qui vaut le quart du prix du premier. Son brochage est exactement identique.

Déroulez le test

Je souhaite que vous obteniez les mêmes résultats que moi pour ce test. Pour cela, démarrez-le en ayant votre registre à décalage initialisé avec les mêmes valeurs que celles de mon test. Je m'étais assuré de bien avoir un niveau bas sur toutes les positions mémoire. Si vous n'obtenez pas cet état en mettant votre circuit sous tension, forcez-le manuellement, comme pour le circuit de test du registre à quatre bits.

Suivez minutieusement les étapes suivantes.

1. Déconnectez l'extrémité du bas du fil de pontage normalement relié à la sortie de la porte XNOR en haut et à gauche. C'est l'entrée série des données.
2. Connectez cette extrémité à la masse.
3. Appuyez huit fois sur le bouton-poussoir pour charger huit zéros.
4. Reconnectez avec précaution le fil de pontage à la sortie de la porte XNOR.

Maintenant, si vous démarrez votre circuit LFSR, vous obtenez la même séquence que celle représentée sur la fig. 35-9, où un 0 représente une LED éteinte, et un 1, une LED allumée. À chaque appui sur le bouton-poussoir, la combinaison de la ligne suivante doit correspondre à celle des LED de votre platine.

Vous vous demandez peut-être comment j'ai généré cette liste. L'ai-je entrée laborieusement d'une main, pendant que l'autre appuyait sur le bouton-poussoir antibond ? En réalité, non. J'ai écrit un petit logiciel qui émule un registre à décalage à rétroaction linéaire et j'ai enregistré sa sortie imprimée. En revanche, j'ai vérifié cette liste par rapport au comportement du circuit, vous pouvez le faire également.

Les nombres binaires étant difficiles à interpréter par le cerveau humain, j'ai généré la même liste en valeurs décimales.

Figure 35-9. Séquence des 255 états des sorties d'un registre à décalage à rétroaction linéaire de 8 bits, se terminant par la répétition de son état de départ.

00000000	11001000	01111001	10000100
00000001	10010001	11110010	00001000
00000011	00100011	11100100	00010000
00000111	01000110	11001001	00100000
00001111	10001101	10010011	01000000
00011110	00011011	00100111	10000001
00111101	00110111	01001110	00000010
01111010	01011111	10011100	00000101
11110100	11011111	00111000	00001011
11101000	10111110	01110000	00010110
11010000	01111101	11100001	00101100
10100001	11111010	11000011	10101001
01000011	11110101	10000110	10110011
10000111	11101010	00001100	01100101
00001110	11010100	00011000	11001100
00011100	10101001	00110001	10011001
00111001	01010010	01100011	00110010
01110010	10100100	11000110	01100101
11100101	01001001	10001100	11001010
11001011	10010010	00011001	10010101
10010111	00100101	00110011	00101011
00101111	01001010	01001111	01010111
01011111	10010100	11001110	10101110
10111111	00101001	10011101	01011100
01111111	01010011	00111010	10111001
11111110	10100110	01110100	01110011
11111101	01001101	11101001	11100111
11111011	10011010	11010010	11001111
11110111	00110100	10100101	10011111
11101110	01101001	01001011	00111110
11011100	11010011	10010110	01111100
10111000	10100111	00101101	11111000
01110001	01001111	01011011	11110001
11100011	10011110	10101111	11100010
11000111	00111100	01011110	11000101
10001110	01111000	11011101	10001010
00011101	11110000	10111010	00010101
00111011	11100000	01110101	00101010
01110110	11000001	11101011	01010101
11101101	10000010	11010110	10101010
11011010	00000100	10101101	01010100
10110100	00001001	01011010	10101000
01101000	00010010	10110101	01010000
11010001	00100100	01101010	10100000
10100011	01001000	11010101	01000001
01000111	10010000	10101011	10000011
10001111	00100001	01010110	00000110
00011111	01000010	10101100	00001101
00111111	10000101	01011000	00011010
01111110	00001010	10110001	00110101
11111100	00010100	01100010	01101011
11111001	00101000	11000101	11010111
11110011	01010001	10001000	10101111
11100110	10100010	00010001	01011110
11001101	01000101	00100010	10111101
10011011	10001011	01000100	01111011
00110110	00010111	10001001	11110110
01101101	00101110	00010011	11101100
11011011	01011101	00100110	11011000
10110110	10111011	01001100	10110000
01101100	01110111	10011000	01100000
11011001	11101111	00110000	11000000
10110010	11011110	01100001	10000000
01100100	10111100	11000010	00000000

0, 1, 3, 7, 15, 30, 61, 122, 244, 232, 208, 161, 67, 135, 14, 28, 57, 114, 229, 203, 151, 47, 95, 191, 127, 254, 253, 251, 247, 238, 220, 184, 113, 227, 199, 142, 29, 59, 118, 237, 218, 180, 104, 209, 163, 71, 143, 31, 63, 126, 252, 249, 243, 230, 205, 155, 54, 109, 219, 182, 108, 217, 178, 100, 200, 145, 35, 70, 141, 27, 55, 111, 223, 190, 125, 250, 245, 234, 212, 169, 82, 164, 73, 146, 37, 74, 148, 41, 83, 166, 77, 154, 52, 105, 211, 167, 79, 158, 60, 120, 240, 224, 193, 130, 4, 9, 18, 36, 72, 144, 33, 66, 133, 10, 20, 40, 81, 162, 69, 139, 23, 46, 93, 187, 119, 239, 222, 188, 121, 242, 228, 201, 147, 39, 78, 156, 56, 112, 225, 195, 134, 12, 24, 49, 99, 198, 140, 25, 51, 103, 206, 157, 58, 116, 233, 210, 165, 75, 150, 45, 91, 183, 110, 221, 186, 117, 235, 214, 173, 90, 181, 106, 213, 171, 86, 172, 88, 177, 98, 196, 136, 17, 34, 68, 137, 19, 38, 76, 152, 48, 97, 194, 132, 8, 16, 32, 64, 129, 2, 5, 11, 22, 44, 89, 179, 102, 204, 153, 50, 101, 202, 149, 43, 87, 174, 92, 185, 115, 231, 207, 159, 62, 124, 248, 241, 226, 197, 138, 21, 42, 85, 170, 84, 168, 80, 160, 65, 131, 6, 13, 26, 53, 107, 215, 175, 94, 189, 123, 246, 236, 216, 176, 96, 192, 128, 0

Selon moi, cela semble être suffisamment pseudo-aléatoire. Mon programme vérifie également que chaque valeur est présente sans omission ni doublon.

Les uns et les zéros

Après avoir vérifié que le diagramme logique de la fig. 35-5 fonctionne bien comme prévu, l'étape suivante consiste à réfléchir au moyen de réduire la séquence, afin qu'elle ne génère qu'un seul 1 ou 0 à chaque cycle. Rappelez-vous que nous voulons utiliser ce dispositif pour le testeur de télépathie dans lequel le circuit allumera ou éteindra une LED.

L'un des moyens serait de mélanger les sorties du registre à décalage dans des portes XOR, exactement comme nous l'avons fait avec les sorties de l'encodeur rotatif de l'expérience 33. Cela fonctionnerait, et vous pourriez utiliser un arbre à trois niveaux de portes XOR, chaque niveau mixant les sorties du niveau précédent, jusqu'à obtenir une seule sortie à 0 ou 1.

Malgré tout, cela n'est pas nécessaire. Il suffit simplement de prélever le signal de la sortie A du registre et de l'utiliser.

A priori, cela n'a pas de sens. En effet, nous avons utilisé plus de sorties du registre à décalage pour obtenir une séquence qui nécessite davantage de cycles avant de se répéter. Et maintenant il faudrait oublier ces bits supplémentaires ?

Pas tout à fait. Les huit emplacements mémoire seront encore utilisés dans le bouclage. Les emplacements 8, 6, 5 et 4 seront encore mixés dans des portes XOR, la séquence s'étendra donc toujours sur 255 états avant de se répéter. Je suggère uniquement de la sous-échantillonner.

Les combinaisons de zéros et de uns nécessiteront toujours 255 cycles avant de se reproduire.

Vous avez peut-être du mal à le croire. En fait, je n'en étais pas convaincu moi-même. La théorie affirme que c'est vrai, j'ai néanmoins décidé de le vérifier par une autre observation. J'ai modifié mon programme informatique afin de ne prélever que le dernier digit à droite des 255 combinaisons du registre à rétroaction linéaire, voici la séquence de 0 et 1 obtenue :

```
0111101000011100101111110111000
1110110100011111001101101100100
01101111101010010010100110100111
1000001001000010100010111011100
1001110000110001100111010010101
11010110101011000100010011000010
0000010110011001010111001111000
1010101000001101011110110000000
```

J'ai ensuite fait fonctionner le circuit, en me concentrant sur la dernière LED à droite. J'ai obtenu exactement la même série.

Quand on prédit un tel phénomène et qu'il s'avère être exact, il y a une forte présomption pour que ce soit répétitif.

Vous pourriez m'opposer le fait que la séquence ne semble pas totalement aléatoire, car elle possède des combinaisons telles que 0000000 et 1111111. Oui, c'est vrai, mais une séquence aléatoire doit effectivement contenir des répétitions de ce type. Rappelez-vous quand vous jouez à pile ou face, le côté pile ou le côté face peut se présenter plusieurs fois de suite. En réalité, la probabilité d'obtenir des répétitions multiples s'accroît quand le nombre d'essais augmente.

La répétition de combinaisons n'est donc pas un problème dans la séquence ci-dessus. Bien entendu, si la suite était constituée en majorité de combinaisons 1111111 et 0000000, ce serait un autre problème ; mais la distribution actuelle des combinaisons est très

correcte. J'ai déterminé la fréquence de répétition des suites de 0 et 1, voici comment elle s'établit :

0 seul — 33 fois

00 — 16 fois

000 — 8 fois

0000 — 4 fois

00000 — 2 fois

000000 — 1 fois

0000000 — 1 fois

Total : 128 présences de la valeur 0

1 seul — 32 fois

11 — 16 fois

111 — 8 fois

1111 — 4 fois

11111 — 2 fois

111111 — 1 fois

1111111 — 1 fois

Total : 127 présences de la valeur 1

Problème de pondération

Il subsiste quelque chose qui ne semble pas correct dans la liste précédente. On compte 33 fois un 0 seul et 32 fois un 1 seul. Pourquoi ? Cette séquence était supposée être uniformément pondérée ! Non, j'ai précisé qu'elle serait « presque » uniformément pondérée.

Voici le problème (qui va nous conduire vers une solution). La séquence complète de toutes les valeurs possibles s'étend de 00000000 à 11111111, avant de se répéter. Mais l'utilisation de portes XNOR pour la rétroaction du registre empêche celui-ci d'afficher la valeur 11111111, qu'il saute. Cette valeur ayant un 1 comme dernier digit, il manque un 1 dans notre tableau de valeurs.

Imaginez que j'essaie de régler ce problème en utilisant l'avant-dernier digit au lieu du dernier. Eh bien non, cela ne réglera pas le problème, car la valeur 11111111 sera toujours omise et il y aura toujours un 0 en plus dans le décompte final.

Je vais maintenant traiter ce problème.

Sautez la valeur 254

Une solution serait d'ajouter davantage de registres à décalage. Imaginez que vous en ayez quatre, reliés en chaîne, permettant de stocker une valeur binaire de 32 bits. Une séquence complète de ce LFSR comporterait plus d'un million de millions de valeurs avant de se répéter. Dans cette séquence, chaque combinaison de 32 uns et zéros serait présente, à l'exception de la dernière constituée de 32 uns. Cette unique valeur manquante serait noyée parmi plus de quatre millions de millions d'autres valeurs, ce qui serait, je pense, tout à fait admissible, pour à peu près tous les usages.

Malheureusement, la réalisation d'un tel circuit représenterait un travail conséquent. Voudriez-vous vraiment câbler quatre registres à décalage et un nombre important de portes XNOR pour générer la rétroaction linéaire, plus quelques composants supplémentaires, simplement pour rendre le test de télépathie mieux équilibré ? Si oui, c'est merveilleux, je serais heureux de voir quelqu'un le réaliser. Personnellement, je n'en ai pas le temps, car comme je l'ai déjà dit, je dois surtout terminer ce livre pour vous permettre de le lire.

Y aurait-il une solution plus simple ? Il suffit simplement que le registre à décalage (d'une façon ou d'une autre) saute l'une des combinaisons de 8 bits qui a un 0 pour dernier bit, afin de combler la combinaison manquante 11111111, qui a un 1 comme dernier bit. Les combinaisons seront alors équilibrées.

Comme la valeur 11111111 est déjà absente, on pourrait se passer de la valeur 11111110 (254 en notation décimale). Cela serait facile en utilisant une porte AND à 7 entrées pour détecter la valeur 11111111 à partir des emplacements mémoire B à H. Cette porte générerait alors une impulsion d'horloge quand sa sortie devient positive, faisant passer le registre à la valeur suivante.

Le diagramme logique complet est exposé sur la fig. 35-10 page suivante.

Existe-t-il un composant avec une porte AND à sept entrées ? Non, mais procurez-vous une porte AND à huit entrées. En reliant la huitième entrée au pôle positif de l'alimentation, les sept autres entrées pourront être utilisées. Ce composant existe dans l'ancienne série 4000B, pas dans la famille 74HC00, mais il conviendra.

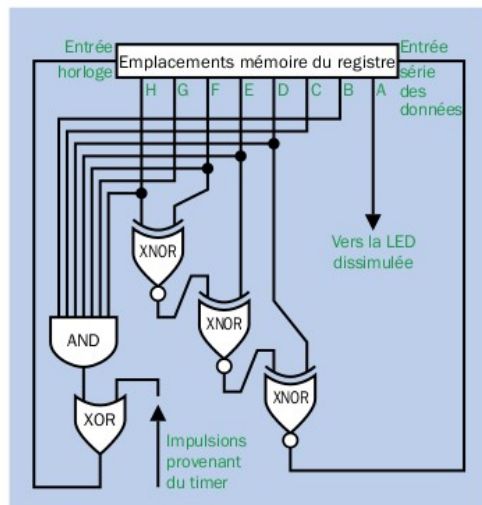


Figure 35-10. Diagramme logique d'un registre à décalage à rétroaction linéaire à sortie binaire équilibrée assurée en forçant le registre à éviter la valeur 11111110.

Partagez l'entrée d'horloge

Vous remarquerez que la sortie de la porte AND n'est pas directement reliée à l'entrée d'horloge du registre à décalage. Ceci est dû au fait que cette entrée doit aussi être utilisée par le timer (ou tout autre moyen de synchronisation) qui fait progresser normalement le registre. C'est ce que j'appelle « l'horloge normale », pour la distinguer de celle provenant de la porte AND.

Pour prendre en compte cette situation, j'ai ajouté une porte XOR. Voici la séquence imaginée des événements.

1. La porte XNOR de rétroaction a atteint la valeur 11111110 que nous devons sauter bien qu'elle soit chargée dans le tampon d'entrée des données.
2. L'horloge normale provoque l'apparition de la valeur 11111110 aux sorties du registre à décalage.
3. La porte AND à huit entrées le détecte immédiatement et génère un niveau haut sur sa sortie qui est reliée à l'une des entrées de la porte XOR.
4. L'impulsion de l'horloge normale n'est pas encore terminée, la sortie de la porte XOR, dont les deux entrées sont au niveau haut, passe donc au niveau bas.

5. L'impulsion de l'horloge normale retombe, mais la valeur interdite 11111110 génère toujours un niveau haut en sortie de la porte AND.
6. La porte XOR a maintenant une entrée haute provenant de la porte AND et une entrée basse venant de l'horloge normale. Sa sortie passe donc au niveau haut.
7. La porte XOR synchronise le registre à décalage qui passe à la combinaison suivante.
8. La porte AND ne détecte plus la valeur 11111110, sa sortie passe donc au niveau bas.
9. Le registre à décalage est maintenant stabilisé jusqu'à l'apparition de la prochaine impulsion de l'horloge normale.

Il découle de ceci que la combinaison 11111110 sera effective durant un court instant, uniquement pendant le reste de la durée d'une impulsion de l'horloge. Si cette impulsion est très brève, la valeur 11111110 sera sautée presque instantanément. Dans le testeur de télépathie, sa durée d'apparition sera trop courte pour provoquer l'allumage de la LED.

C'est en tout cas la façon dont je pense que cela va fonctionner. Nous le prouverons dans l'expérience suivante.

Y a-t-il d'autres possibilités ?

Bloquer une combinaison n'est pas une solution très élégante au problème. Il existe peut-être une meilleure approche, mais je n'en suis pas sûr. J'ai même consulté quelques amis investis dans les activités de cryptage, où des grands registres à décalage à rétroaction linéaire génèrent des nombres pseudo-aléatoires. Ils m'ont seulement conseillé d'utiliser davantage de registres à décalage, ce qui m'a semblé trop problématique.

Ma solution reste donc le saut d'une valeur, faute de mieux.

Valeur de départ

Il reste un point que l'on n'a pas encore considéré. S'il n'y a pas de pics de tension, le registre à décalage sera toujours initialisé à la valeur 00000000.

Évidemment, si le jeu doit paraître imprévisible, cela n'est pas le cas tant qu'il commence de la même façon. On doit donc démarrer le processus à un point quelconque de la séquence. Comment peut-on faire ?

La réponse est simple, il suffit d'imposer une valeur de départ différente à chaque fois au registre à décalage. Dans un programme informatique, la valeur de l'horloge de l'ordinateur est souvent utilisée à cette fin, car elle représente le temps qui change constamment. Pour le circuit de randomisation utilisant des portes XNOR, il serait judicieux d'effectuer un nombre de cycles au hasard avant de l'intégrer dans un jeu.

Pas de problème, nous pouvons utiliser le procédé décrit dans l'expérience 34, où un ensemble condensateur-résistance synchronise un temporisateur monostable lent quand la tension d'alimentation est appliquée. La durée de cette impulsion dépendra d'un capteur quelconque. Pendant la durée de son impulsion, le timer lent active un autre temporisateur astable rapide. La sortie de ce second timer est utilisée comme horloge du registre à décalage. À la retombée de l'impulsion du timer lent, le LFSR s'arrête sur une valeur inconnue et nous sommes prêts pour une randomisation parfaitement équilibrée.

Pour aller plus loin : autres jeux et autres nombres

Avant d'en venir au testeur de télépathie, je tiens à vous montrer les différentes façons d'utiliser la sortie d'un registre à décalage à rétroaction linéaire. Je l'appellerai générateur aléatoire universel à 8 bits dans les applications suivantes.

LED clignotantes

Supposez que vous disposiez de huit LED : deux rouges, deux vertes, deux bleues et deux jaunes. Chaque paire de LED est alimentée par deux sorties d'un registre à décalage. Une sortie s'effectue à travers une résistance de 330 Ω , l'autre, par l'intermédiaire d'une résistance de 1K. Chaque couleur a alors quatre états de luminosité différents : éteinte, basse, moyenne et haute. La fig. 35-11 montre la façon de réaliser un tel circuit, en utilisant un réseau de transistors Darlington pour pouvoir piloter des LED à forte luminosité.

Si vous placez les LED derrière une surface diffuseuse (comme les diffuseurs en plastique des anciens luminaires à tubes fluorescents), vous obtenez un effet clignotant agréable, si le registre à décalage fonctionne assez rapidement.

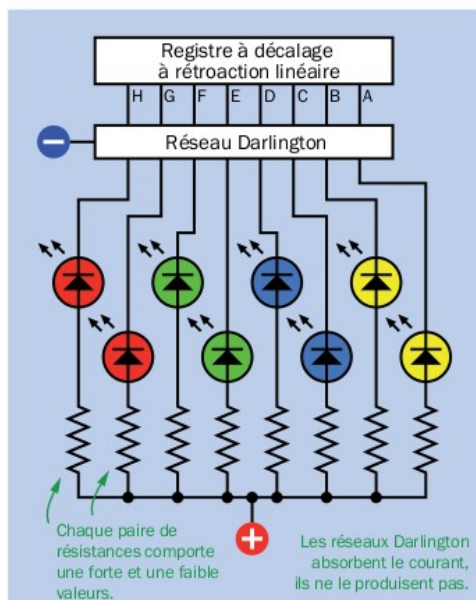


Figure 35-11. Utilisation d'un registre à décalage à rétroaction linéaire pour provoquer un clignotement pseudo-aléatoire de diodes LED.

Sélection d'une fente

Dans le jeu de la fente magique, le registre à décalage à rétroaction linéaire peut être utilisé pour piloter le multiplexeur. Reliez simplement quatre sorties du registre à décalage aux lignes de commande du multiplexeur.

Variante du compteur en anneau

Dans l'expérience 26, un compteur en anneau assurait l'allumage séquentiel de seize LED. Vous pourriez utiliser un LFSR pour les faire clignoter de façon aléatoire via un multiplexeur. S'il y a également seize poussoirs placés à côté des LED, le défi sera d'appuyer sur le bouton quand la LED correspondante sera allumée.

La tension qui alimente les LED pourrait être appliquée aux contacts des boutons poussoirs dont les autres fils seraient reliés à un buzzer de façon à ce qu'il retentisse, et incrémente votre score, quand vous appuyez sur le poussoir correspondant à la LED allumée (voir fig. 35-12 page suivante).

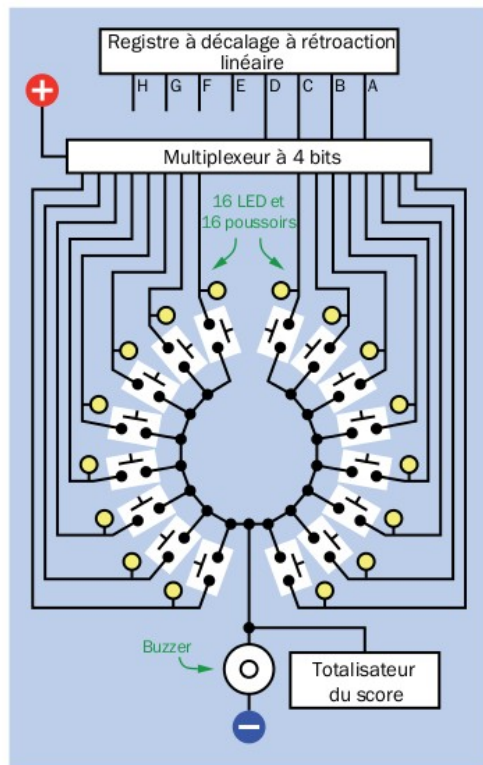


Figure 35-12. Le jeu de l'expérience 26 avec un compteur en anneau peut être modifié en utilisant un registre à décalage rétroaction linéaire pour commander aléatoirement l'allumage des LED. Le joueur doit essayer d'appuyer sur le bouton-poussoir à côté de chaque LED allumée.

Si vous utilisez des interrupteurs à lames souples au lieu des poussoirs, placez le tout derrière une fine feuille en plastique transparent. Dissimulez un interrupteur Reed à côté de chaque LED. Le joueur n'aurait qu'à diriger un stylet à bout aimanté en direction de la LED allumée pour activer l'interrupteur placé à proximité. Cela constituerait une présentation élégante du jeu et éviterait qu'un joueur ne triche en activant simultanément plusieurs poussoirs. Il faudrait bien entendu choisir astucieusement la force des aimants pour activer correctement un interrupteur Reed sans influencer les interrupteurs voisins.

Tonalités aléatoires

En utilisant encore quatre sorties pour contrôler un multiplexeur, on pourrait relier seize résistances à un timer générant des fréquences audibles. En utilisant des potentiomètres ajustables au lieu de résistances fixes, il serait possible d'ajuster les tonalités dans l'échelle musicale diatonique. (Vous devrez utiliser un instrument à clavier comme référence, pour régler correctement les sons.)

Le résultat ne sera pas vraiment musical, mais si la tonalité change lentement, l'effet pourrait être agréable (voir fig. 35-13).

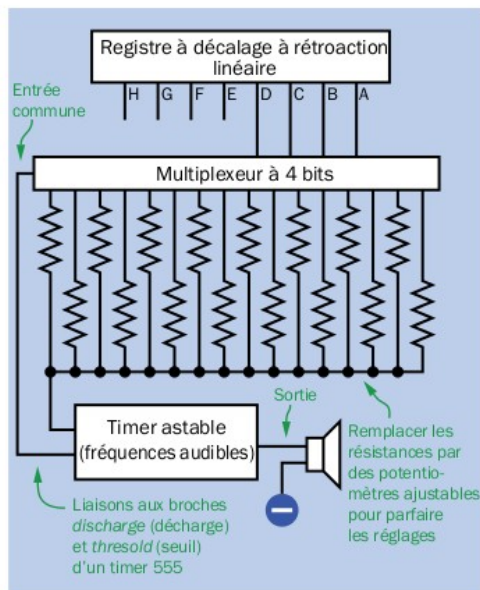


Figure 35-13. Utilisation d'un LFSR pour générer seize tonalités musicales aléatoirement.

On pourrait utiliser alternativement deux multiplexeurs, chacun utilisant quatre des huit sorties du registre à décalage. L'un des multiplexeurs contrôlerait la tonalité, l'autre modifiant la qualité du son en insérant des ensembles condensateur-résistance entre la sortie et la masse (voir la fig. 35-14).

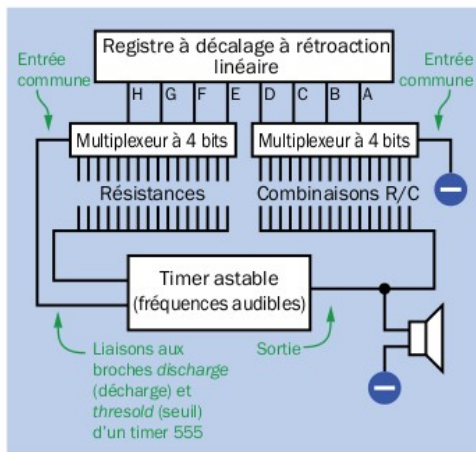


Figure 35-14. Des couples résistance-condensateur pourraient être sélectionnés aléatoirement par un second multiplexeur, pour ajouter une variation de la qualité sonore d'un générateur de tonalités aléatoires.

Contrôle du Yi Jing électronique

Au lieu de la valeur de la résistance de l'extrémité du doigt suggérée pour le Yi Jing électronique (voir *expérience27*), on pourrait utiliser quatre sorties d'un registre à décalage à rétroaction linéaire, pour commander le circuit décodeur.

Pour aller plus loin : randomisation par microcontrôleur

Le principe de la rétroaction linéaire d'un registre à décalage est utilisé dans les langages de programmation informatique pour générer des suites de nombres pseudo-aléatoires. C'est aussi le cas des langages de haut niveau, présents dans certains microcontrôleurs. Selon le microcontrôleur utilisé, certaines instructions devraient permettre de générer un nombre aléatoire à la demande.

Mais la distribution des valeurs serait-elle uniformément pondérée ? Je dois avouer que, quand j'ai étudié la version du langage Basic mis en œuvre dans le microcontrôleur PIC (le PICAXE), je n'ai pas été impressionné. Selon la gamme de valeurs indiquée, certaines valeurs revenaient plus souvent que d'autres. Si vous pensez que le langage C utilisé avec Arduino pourrait donner de meilleurs résultats de randomisation, je vous encourage à le vérifier pour le savoir. Sachez qu'il est courant de lire la valeur d'une entrée non connectée du circuit, à l'aide du convertisseur analogique-numérique afin d'obtenir une valeur arbitraire de départ du générateur interne de nombres aléatoires.

Le degré de paranormalité d'un individu

Expérience

36

Voici mon plan. Il y aura une LED derrière un écran. Un circuit électronique allumera ou non la LED, puis demandera au joueur de deviner l'état de la LED, en utilisant ses pouvoirs divinatoires, s'il a assez de chance pour en posséder.

Le joueur appuiera sur un bouton-poussoir situé à sa droite s'il pense que la LED est allumée, ou à sa gauche s'il pense qu'elle est éteinte. Le circuit lui indiquera si sa réponse est correcte ou non, et le cycle recommencera.

Je pense que vous avez maintenant toutes les connaissances nécessaires pour réaliser ce circuit. Combien de bonnes réponses pensez-vous qu'un joueur doit fournir par rapport à ses mauvaises réponses, pour obtenir un résultat trop improbable pour ne pas être qu'une question de chance ? Je vais expliquer comment ceci peut être évalué après avoir construit le circuit.

Derniers diagrammes logiques

Dans la précédente expérience, j'ai décrit le diagramme logique d'un générateur de nombres délivrant aléatoirement des 0 ou des 1, et utilisant des portes XNOR. Sur la fig. 36-1, je l'ai légèrement modifié pour le rendre compatible avec le circuit de test de télépathie auquel je pense.

- J'ai remplacé la porte AND à sept entrées par une porte NAND. Au lieu de générer un niveau de sortie haut quand elle détecte la combinaison interdite 1111111, cette porte génère un niveau bas. Il sera plus facile à utiliser dans la suite du circuit.
- J'ai ajouté une porte XNOR près de la sortie binaire A. Quand cette sortie est au niveau haut, la sortie du circuit XNOR est basse et vice versa. En d'autres termes, cette porte logique correspond

à un inverseur. Pourquoi ne pas avoir utilisé un inverseur ? Simplement parce que j'avais une porte XNOR disponible dans le circuit intégré quadruple XNOR à deux entrées qui générerait la rétroaction du registre à décalage. Il est préférable d'utiliser des portes disponibles plutôt que d'ajouter un circuit intégré supplémentaire.

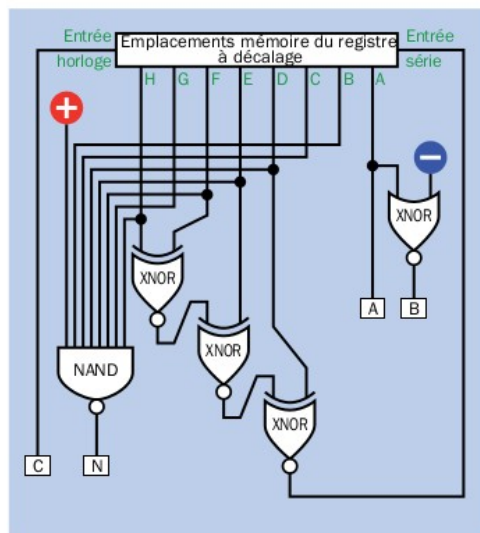


Figure 36-1. Diagramme logique de la première partie du testeur de télépathie pour une seule personne. Les entrées et les sorties identifiées A, B, C et N seront reliées à la seconde partie du circuit.

Le schéma de la première partie du circuit est présent sur la fig. 36-2 page suivante. Il est assez proche du circuit de test de l'expérience précédente. La modification la plus visible est l'ajout de la porte NAND. Les entrées et les sorties, identifiées par les lettres A, B, C et N, doivent être reliées à la seconde partie du circuit.

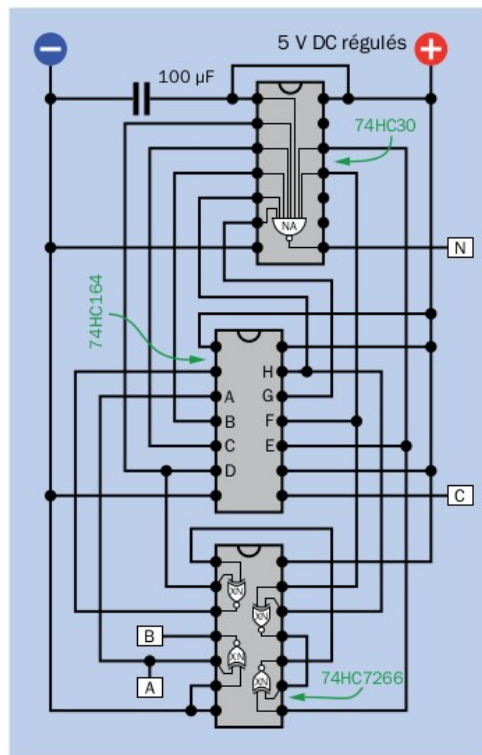


Figure 36-2. Schéma de la première partie du testeur de télépathie pour une seule personne.

Abordons la seconde partie

La fig. 36-3 présente la deuxième partie du diagramme logique. Dans ce diagramme, les timers sont colorés en rose pour plus de clarté, et il y a les quatre entrées/sorties à relier à celles de la fig. 36-1.

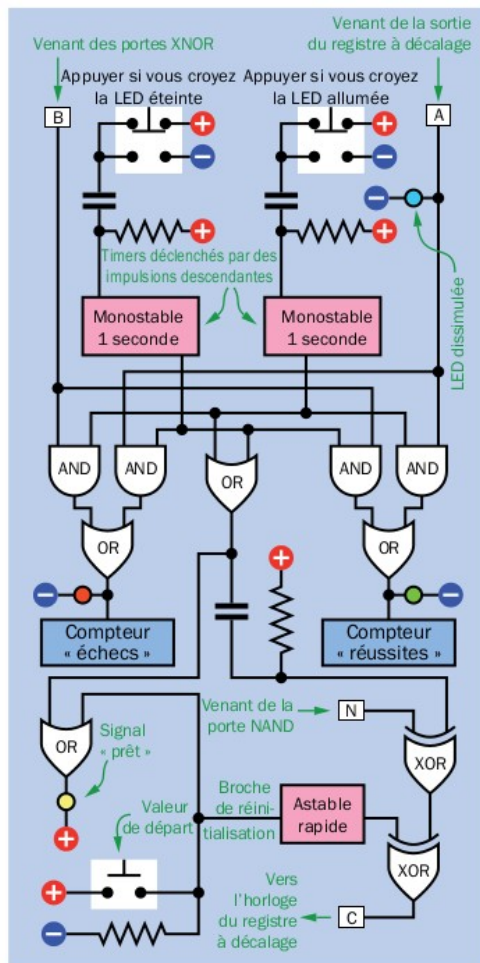


Figure 36-3. Seconde partie du diagramme logique du testeur de télépathie pour une seule personne, traitant l'entrée de l'utilisateur et générant la valeur initiale du registre à décalage à rétroaction linéaire.

Le fonctionnement de la seconde partie peut être résumé ainsi.

1. Le joueur voit le signal « prêt ».
2. Le joueur appuie sur le bouton A s'il pense que la LED est allumée, ou sur le bouton B s'il pense qu'elle est éteinte.

3. Le signal « prêt » s'éteint pendant environ une seconde, durant laquelle le circuit fournit une indication gagné ou perdu et incrémente le compteur correspondant.
4. Le signal « prêt » se rallume et le joueur recommence à partir de la deuxième étape.

Du côté de l'électronique, ça va être un peu plus compliqué.

Logique d'entrée

La précision étant indispensable, il ne doit y avoir aucun risque de rebonds des interrupteurs d'entrée. Pour cela, je relie chaque entrée au travers d'un timer monostable d'une seconde de configuration identique à celle que j'ai utilisée précédemment afin de générer une impulsion unique, propre, qui ne se répète pas si quelqu'un appuie trop longtemps sur un interrupteur.

Les sorties des timers d'une seconde doivent alors être comparées avec les sorties du diagramme précédent. La sortie du registre à décalage se trouve à droite, elle sera haute quand la LED dissimulée sera allumée. La sortie venant de la porte XNOR, située à gauche du diagramme, sera haute lorsque la LED sera éteinte.

Il existe deux façons de réussir le pari.

- La LED cachée est allumée et le joueur appuie sur le bouton-poussoir « LED allumée ».
- Ou la LED est éteinte et le joueur appuie sur l'interrupteur « LED éteinte ».

De même, il y a deux façons de perdre le pari.

- La LED cachée est allumée et le joueur appuie sur le bouton-poussoir « LED éteinte ».
- Ou la LED est éteinte et le joueur appuie sur l'interrupteur « LED allumée ».

Les deux paires de portes AND, chacune étant reliée à une porte OR, réalisent cette logique, de façon à peu près identique aux portes AND et OR utilisées dans la version originale du jeu à deux joueurs.

Les deux LED (ronds rouge et jaune) indiquent immédiatement au joueur si sa supposition est correcte ou non, et deux compteurs (optionnels) permettent d'enregistrer le nombre de bonnes et mauvaises réponses. Je décrirai les compteurs plus tard.

Le reste du circuit sera en attente d'une impulsion en provenance du timer de gauche OR (OU) du timer de droite. La sortie de cette porte OR est en charge de deux aspects.

Le signal « prêt »

La sortie de la porte OR est reliée à l'entrée d'une autre porte OR en bas à gauche qui contrôle le signal « Prêt ». Pourquoi cela ? En fait, je veux que le signal « Prêt » soit toujours haut, sauf dans deux circonstances.

- Pendant une seconde après que le joueur a appuyé sur un des interrupteurs pour indiquer son choix.
- OR (OU) durant le choix de la valeur initiale de départ du registre à décalage, le circuit n'étant pas encore prêt.

En reliant la LED du signal « Prêt » au pôle positif de l'alimentation comme indiqué, ces conditions seront respectées.

Le reste du temps, la porte OR, à gauche, aura ses deux entrées au niveau bas, permettant l'allumage de la LED « Prêt » qui absorbera le courant de sortie cette porte. Rappelez-vous qu'un circuit de la série 74HC00 peut absorber autant de courant (20 mA) qu'il peut en fournir. Vous pouvez donc l'utiliser des deux façons.

J'aurais pu utiliser une porte NOR à la place, en reliant la LED « Prêt » à la masse comme d'habitude, mais cela aurait nécessité l'utilisation d'un circuit intégré supplémentaire pour disposer de cette porte. Comme une porte OR était inutilisée, j'en ai profité.

Initialisation aléatoire

Dans l'expérience 35, j'ai mentionné qu'il fallait initialiser aléatoirement le registre à décalage (voir expérience 35). J'ai choisi de demander au joueur de le faire manuellement, de sorte qu'un seul timer rapide soit nécessaire au lieu d'un timer lent commandant le timer rapide. Lorsque l'on n'appuie pas sur le bouton-poussoir de chargement d'une valeur de départ, en bas à gauche du diagramme, un niveau bas est présent sur la broche de réinitialisation du timer rapide. Rappelez-vous qu'un niveau bas sur cette broche arrête le timer. Quand ce bouton-poussoir est activé, le niveau haut permet au timer de fonctionner.

La sortie du timer rapide est transmise à travers la porte XOR en bas à droite, afin d'envoyer son impulsion à l'entrée d'horloge du registre à décalage.

Avant de rejouer, le joueur ne doit pas oublier d'actionner le poussoir de chargement de la valeur de départ pendant un temps indéterminé. Comme il s'agit d'un appareil utilisé pour l'étude sérieuse des phénomènes paranormaux (!), je fais confiance au joueur pour accomplir ce rituel d'initialisation.

Deux portes XOR additionnelles

Voici maintenant la partie astucieuse. Revenez à la porte OR du centre. Sa sortie est reliée par un condensateur à l'entrée de la porte XOR située en dessous. Le condensateur a une valeur plus petite que ceux utilisés dans les expériences précédentes, car le circuit logique a une entrée extrêmement sensible. Dans mon expérience, un condensateur de 68 pF transmet une impulsion suffisamment courte pour activer la porte XOR sans créer de multiples niveaux positifs erronés. Si vous testez le circuit et trouvez son fonctionnement erratique, essayez d'utiliser un condensateur de valeur supérieure ou inférieure. Pour vous aider dans ce sens, j'ai prévu des condensateurs de rechange de 47 pF et 100 pF dans la liste du matériel à acheter, figurant en annexe.

Rappelez-vous que $1\,000\text{ pF} = 1\text{ nF}$

Le niveau de l'entrée droite de la porte XOR est normalement haut, en raison de la présence de la résistance de rappel au pôle positif de l'alimentation. Son entrée gauche est également normalement au niveau haut puisqu'elle est reliée à la sortie de la porte NAND à sept entrées de la section précédente du circuit, cette porte ayant normalement une sortie au niveau haut jusqu'à ce qu'elle détecte la combinaison 1111111 qui est rejetée.

Quand une porte XOR a ses deux entrées hautes, elle génère une sortie basse. Le niveau de sortie de la première porte XOR est donc normalement bas. Cette sortie est reliée à la seconde porte XOR qui a sa sortie au niveau bas tant que le timer astable ne fonctionne pas. Cette porte XOR a donc deux entrées au niveau bas, ce qui génère un niveau de sortie bas qui est connecté à l'entrée d'horloge du registre à décalage.

Que se passe-t-il lorsque le joueur active un poussoir ? Rien avant la fin de l'impulsion du timer d'une seconde.

Quand l'impulsion se termine, la sortie de l'autre timer d'une seconde passe du niveau haut au niveau bas. Le condensateur de 68 pF transmet cette transition sous la forme d'une impulsion basse très brève.

Pendant cette impulsion, la première porte XOR a son entrée droite au niveau bas, alors que son entrée gauche est toujours haute. En conséquence, sa sortie passe au niveau haut. La deuxième porte XOR a donc un niveau haut et un niveau bas, sa sortie passe alors au niveau haut, provoquant l'avance d'un pas de l'horloge du registre à décalage.

L'impulsion basse transmise par le condensateur est très courte. Lorsqu'elle prend fin, la résistance de rappel reprend le dessus et les deux portes XOR reviennent à leur état initial. Le registre à décalage a été synchronisé, ce qui a créé une nouvelle valeur, et le signal « prêt » s'allume, invitant le joueur à faire une autre tentative.

Tout cela est relativement simple, mais pourquoi ai-je besoin de deux portes XOR pour le faire fonctionner ? Il y a trois raisons de faire avancer le registre à décalage par une impulsion d'horloge.

1. Quand le joueur a appuyé sur un des poussoirs. Je viens juste d'expliquer comment cette action fait avancer le registre à décalage d'un pas.
2. Quand le timer rapide provoque l'initialisation de la valeur de départ du registre à décalage.
3. Quand le registre à décalage atteint l'état 11111110 qui est rejeté.

Les deux portes XOR prennent en compte ces situations quand elles se produisent simultanément ou presque. C'est la partie du circuit difficile à comprendre.

Le timing explique tout

La fig. 36-4 illustre la façon dont les portes fonctionnent dans des circonstances normales, quand le joueur appuie sur un poussoir, provoquant la génération d'une impulsion par l'un des timers de durée une seconde. À la fin de cette impulsion, la sortie du timer passant au niveau bas, le condensateur de liaison transmet la transition et la porte XOR génère une impulsion haute transmise au registre à décalage pour le faire passer à l'état suivant.

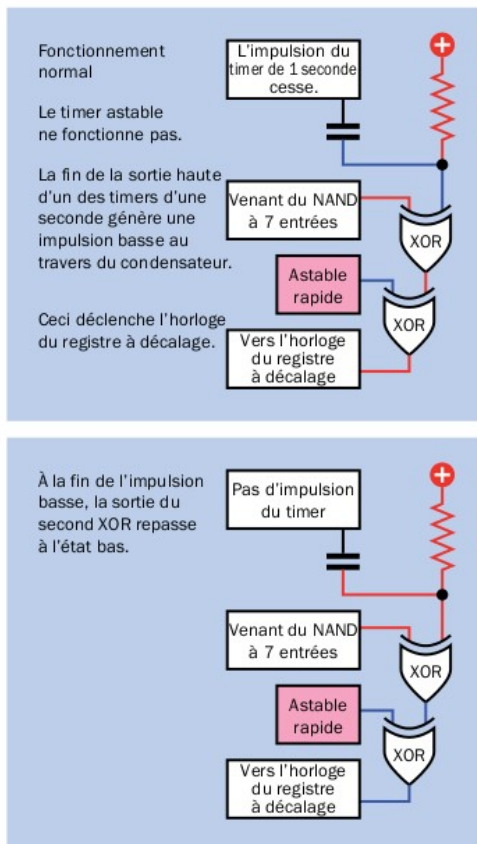


Figure 36-4. En réponse à une transition basse sur le condensateur de liaison, les deux portes XOR transmettent une impulsion haute à l'horloge du registre à décalage.

Qu'arrive-t-il si le registre à décalage atteint la valeur 11111110, l'état refusé ? La séquence des changements est représentée sur la fig. 36-5. La porte NAND de la première partie du circuit réagit aux sept niveaux hauts en abaissant sa sortie au niveau bas. Mais l'impulsion basse venant du condensateur de liaison n'étant pas encore terminée, la sortie vers l'horloge passe au niveau bas.

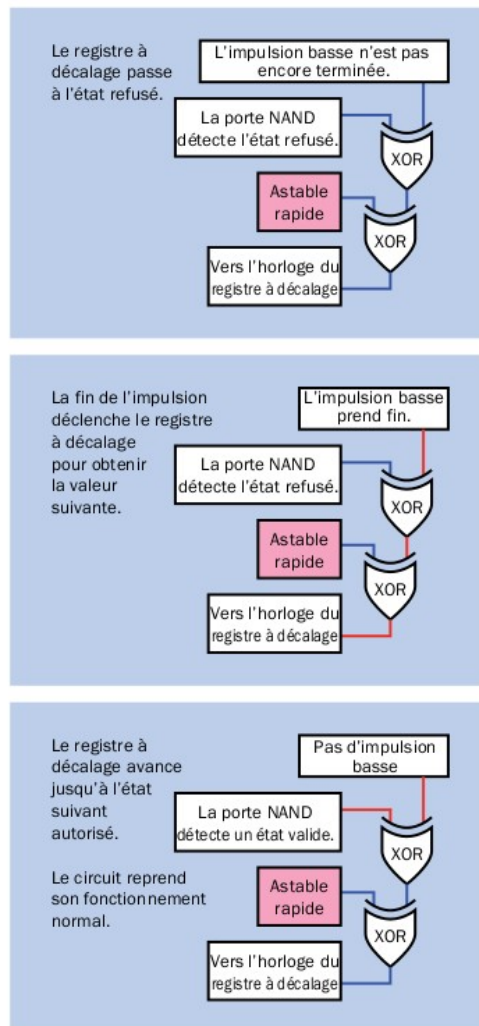


Figure 36-5. Les deux portes XOR traitent un niveau bas en provenance de la porte NAND de la première partie du circuit, indiquant que le registre à décalage a atteint la valeur 11111110 qui est refusée.

Aussitôt que l'impulsion cesse, la résistance de rappel de la première porte logique XOR force son entrée au niveau haut, ce qui provoque une impulsion d'horloge haute, faisant avancer le registre à décalage d'un pas.

La sortie de la porte NAND repasse au niveau haut, car l'état suivant n'est pas refusé. L'horloge passe à l'état bas et le circuit retourne à l'équilibre.

Une suite identique d'événements se déroule lorsque le registre à décalage est initialisé par le timer astable rapide. Pendant que le timer fonctionne, s'il fait avancer le registre à décalage jusqu'à l'état refusé, les deux portes XOR forcent le registre à décalage à sauter cet état. Ceci interviendra même si le timer s'arrête quand l'état refusé est atteint. Le registre à décalage passera encore à l'état suivant.

Le système fonctionnera de façon incorrecte seulement si deux événements surviennent presque simultanément. Même en ce cas, le pire pouvant arriver sera le maintien du circuit à l'état refusé jusqu'à ce qu'un joueur appuie sur un bouton. Cela déclenchera l'avance du registre à décalage, car tout changement en entrée de la porte XOR fera basculer la sortie vers l'horloge.

- Quand une rétroaction est appliquée à un système logique, les conséquences peuvent être complexes. Dans un ordinateur, l'horloge système assure la synchronisation entre les différents circuits (plus ou moins), ceci permet d'éviter le type de problèmes que je viens de décrire. Un ordinateur est un système « synchrone ».
- Le testeur de télépathie pour un seul joueur est un circuit asynchrone, avec toutes les conséquences intéressantes qui en découlent.

Comptage de toutes les tentatives

Comment allez-vous évaluer votre niveau de réussite dans cette expérience ? Si vous n'imaginez pas enregistrer le score manuellement et si vous disposez d'un microcontrôleur, reliez la sortie de chaque tentative réussie à une entrée et celle de chaque échec à une autre entrée et exécutez un petit logiciel qui additionnera les entrées et affichera les scores sur un écran LCD.

Comment totaliser vos essais automatiquement si vous n'avez pas de microcontrôleur ? Achetez une paire de compteurs d'événements. Pour cela, cherchez « compteur numérique » sur eBay. Ces petits appareils très utiles sont économiques. Vous constaterez qu'ils acceptent de nombreuses possibilités de signaux d'entrée et de tensions d'alimentation. Il ne vous restera plus qu'à connecter votre circuit au compteur en respectant la

masse commune et relier la sortie de votre circuit à l'entrée du compteur au travers d'un condensateur de liaison (afin d'éviter la transmission de la composante continue).

D'un autre côté, totaliser les scores sur une feuille de papier n'est pas une mauvaise idée. Alors que vous êtes assis à votre bureau, appuyant sur un bouton ou l'autre, il est facile d'utiliser un stylo de l'autre main.

Schéma de la seconde partie

Les plaques de montage du circuit sont présentées sur la fig. 36-6 et la fig. 37-7. Des LED supplémentaires ont été ajoutées pour les besoins de la mise au point.

La fig. 36-8 montre l'assemblage de tous les composants qui effectuent les fonctions de la fig. 36-3. Notez que j'ai dû resserrer les composants entre eux afin qu'ils tiennent dans l'espace disponible. Seuls six circuits intégrés peuvent être placés aisément sur la plaque de montage et les connexions sont relativement simples.

Rappelez-vous que chaque rond rouge, jaune, vert et bleu, représente une LED, et assurez-vous de relier la LED jaune, qui est le signal « prêt » entre la porte OR et le pôle positif de l'alimentation, et non la masse. Les autres LED sont normalement reliées à la masse. Vous devrez évidemment intégrer des résistances série si vos LED les requièrent.

Les points A, B, C et N seront reliés aux points A, B, C et N de la première partie du circuit, sur la platine de montage placée à proximité.

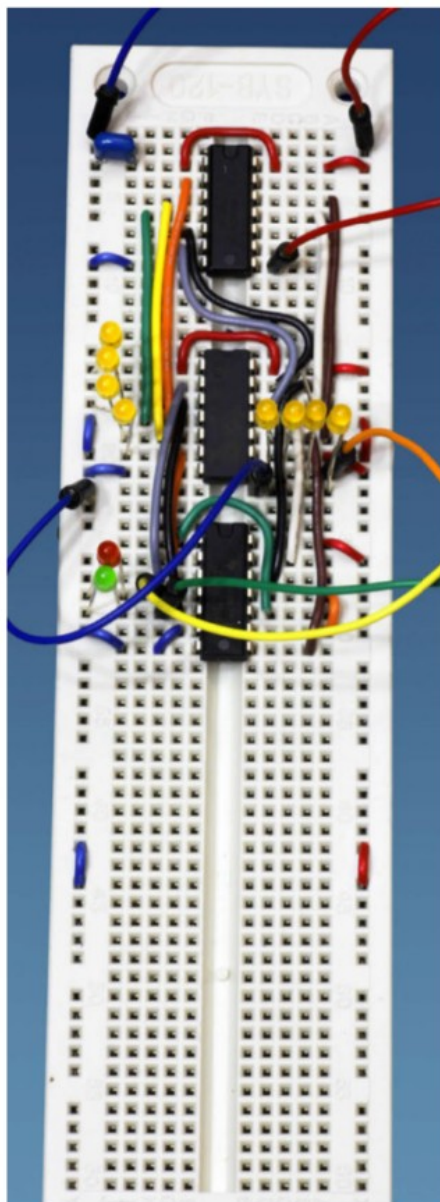


Figure 36-6. Câblage de la première partie du testeur de télépathie pour une seule personne.

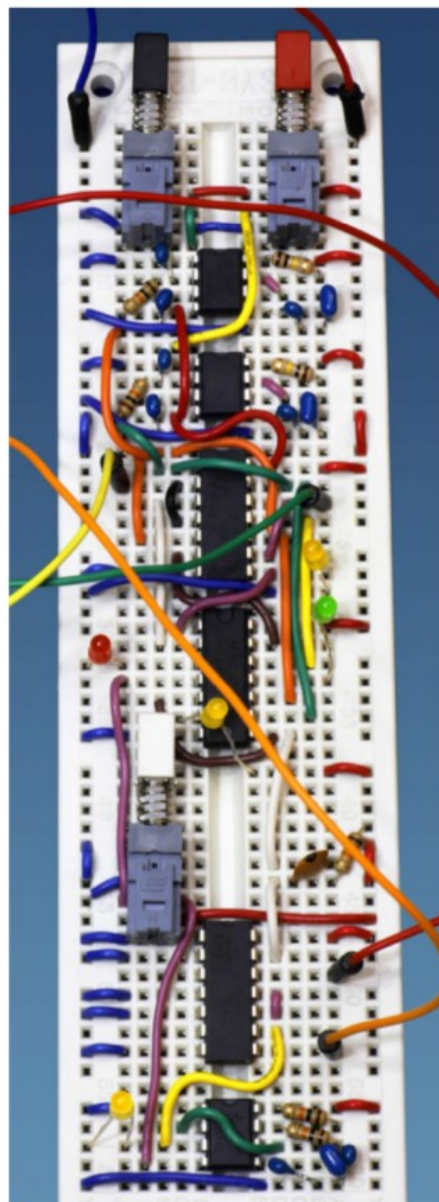


Figure 36-7. Câblage de la deuxième partie du testeur de télépathie pour une seule personne.

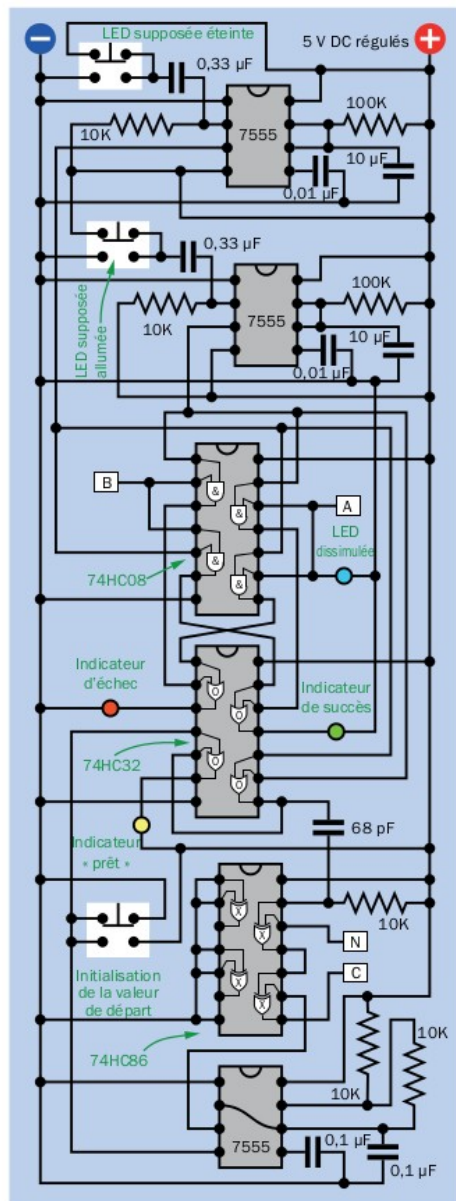


Figure 36-8. Schéma de la seconde partie du circuit du testeur de télépathie pour une seule personne.

Test du testeur

Pour commencer, réduisez la vitesse du temporisateur rapide en bas de la seconde plaque de montage en utilisant un condensateur de 10 µF sur sa broche 6. Ajoutez également des LED à faible intensité aux sorties du registre à décalage de la première platine. Si vous utilisez des LED munies d'une résistance en série, prévues pour une tension de 12 V DC, leur consommation sera suffisamment faible pour permettre au registre à décalage de piloter correctement les circuits intégrés NAND et XNOR.

Maintenez le poussoir d'initialisation de la valeur de départ appuyé, les LED reliées au registre à décalage s'allument selon la séquence de rétroaction linéaire qui vous est maintenant familière. Si cela ne se produit pas, vous avez fait une erreur de câblage.

Contrôlez les poussoirs « LED éteinte » et « LED allumée » et assurez-vous qu'ils génèrent bien une impulsion d'une seconde. Vous êtes maintenant prêt pour la partie la plus intéressante, consistant à vérifier que le circuit saute la valeur refusée.

Lorsque vous mettez sous tension, le condensateur de 100 µF sur la première platine de montage évite toute fluctuation qui provoquerait le chargement d'une valeur quelconque dans le registre à décalage. Il pourrait y avoir un problème en déconnectant l'alimentation, puis en la reconnectant, sans que le condensateur n'ait eu le temps de se décharger, fournissant assez d'énergie au circuit pour conserver son état précédent. Pour accélérer cette opération, essayez de court-circuiter le condensateur de 100 µF (mais en vous assurant que l'alimentation est bien déconnectée avant de vous lancer).

Considérons qu'au démarrage, le registre à décalage soit bien chargé avec huit niveaux bas, appuyez alors rapidement 24 fois sur le poussoir de chargement de la valeur de départ (toujours avec le condensateur de 10 µF pour ralentir le timer) afin d'obtenir la valeur précédant celle qui est rejetée (voir fig. 35-9 pour vous remémorer la séquence).

Si vous appuyez maintenant sur le bouton de chargement de la valeur de départ ou sur l'un des interrupteurs de choix de l'état de la LED, le registre à décalage devrait sauter la 26^e valeur (celle qui est refusée) et passer immédiatement à la 27^e. J'ai obtenu un fonctionnement fiable sur mon montage. Si vous rencontrez

un quelconque problème, expérimentez différentes valeurs pour le condensateur de 68 pF.

Quand votre circuit fonctionnera, nous passerons à la partie intéressante : l'interprétation des résultats.

Quelle est l'imprévisibilité de la perception extrasensorielle ?

Supposons que vous procédiez à un millier d'essais. Statistiquement, 500 d'entre eux devraient être réussis. Mais imaginez que vous obteniez 510 réponses correctes, ou 520 ou encore 530. De combien devriez-vous vous éloigner de la valeur médiane pour que le résultat semble ne pas être uniquement une question de chance ?

C'est une question complexe, je commencerai donc par la simplifier. Si vous effectuez simplement quatre tentatives à la suite, et que vous utilisez la lettre O pour représenter une réponse correcte et N pour un échec, il y a seize séquences possibles, chacune étant identiquement probable : NNNN, NNNO, NNON, NNOO, NONN, NONO, NOON, NOOO, ONNN, ONNO, ONON, ONOO, OONN, OONO, OONN, OOOO.

Ne vous souciez pas de l'ordre de vos essais. Assurez-vous seulement que leur quantité est correcte. Pour cela, il faut grouper les réponses correctes et les échecs sans tenir compte de leur ordre, de la façon suivante.

- NNNN : 1 façon de n'obtenir aucun essai correct.
- NNNO, NNON, NONN, ONNN : 4 façons d'obtenir 1 essai correct.
- NNOO, NOON, OONN, NONO, ONON, ONNO : 6 façons d'obtenir 2 essais corrects.
- OONN, OONO, ONOO, NOOO : 4 façons d'obtenir 3 essais corrects.
- OOOO : 1 façon d'obtenir 4 essais corrects.

Il existe quatre possibilités d'obtenir trois essais corrects et le nombre d'essais possibles est de seize. La probabilité d'obtenir trois réponses correctes sur quatre (peu importe l'ordre) est $4/16$, soit 25 %.

Mais attendez ! Que se passe-t-il si vous obtenez quatre réponses justes sur quatre ? C'est encore mieux ! Il faut donc reformuler notre question. Quelle sont les chances pour que vous obteniez trois réponses correctes, ou davantage ?

Une fois cette condition ajoutée, les chances s'améliorent à $5/16$, soit un peu plus de 31 %.

Si vous prolongez le raisonnement pour calculer les chances pour cinq, six ou davantage d'essais, vous remarquerez que le nombre de combinaisons de O/N devient rapidement très grand. Il y a cependant un moyen de trouver le nombre combinaisons, comme le montre la fig. 36-9. Voici comment vous servir de cette table de valeurs.

1	1
1 1	2
1 2 1	4
1 3 3 1	8
1 4 6 4 1	16
1 5 10 10 5 1	32
1 6 15 20 15 6 1	64
1 7 21 35 35 21 7 1	128
1 8 28 56 70 56 28 8 1	256

Figure 36-9. Le triangle de Pascal peut être utilisé pour déterminer les chances d'obtenir un nombre correct de réponses dans une série où une réponse correcte et une réponse incorrecte sont identiquement probables.

Le deuxième nombre de chaque ligne équivaut au nombre de tentatives par essai. Par exemple, la ligne du bas décrit un essai de huit tentatives.

Les nombres dans chaque ligne indiquent combien de façons il y a (c'est-à-dire le nombre de permutations) de réussir une tentative, en commençant par zéro (une seule possibilité d'y parvenir, représentée par le chiffre 1, en début de ligne) et se terminant par toutes les tentatives réussies (une possibilité d'y parvenir, symbolisée par le chiffre 1, en fin de ligne).

Entre ces extrêmes, les valeurs sur une ligne du triangle indiquent successivement le nombre de façons de réussir 1, 2, 3, ..., n tentatives, où n est le nombre total de tentatives (correctes ou non). Par exemple, la dernière ligne vous indique que si vous réalisez huit tentatives et que vous voulez savoir combien il existe de moyens d'en obtenir quatre correctes, la réponse est 70. Comptez simplement sur la ligne de la façon suivante : 0, 1, 2, 3, 4... et vous obtenez le nombre 70.

- Rappelez-vous que le premier nombre de chaque ligne (toujours égal à 1) représente le nombre de possibilités de ne réussir aucune tentative. Le deuxième est le nombre de façons de réussir une tentative et ainsi de suite, jusqu'au nombre de façons de réussir toutes les tentatives (toujours 1).
- Le nombre en blanc dans la colonne la plus à droite est la somme des nombres de chaque ligne du triangle. En d'autres termes, il s'agit du nombre total de séquences différentes de tentatives réussies et manquées. Notez que ce nombre double pour chaque nouvelle ligne du triangle. Vous pouvez maintenant calculer les probabilités.

En revenant à l'exemple précédent, si vous voulez savoir la probabilité de réussir quatre tentatives parmi huit, le résultat est 70 (en n'importe quel ordre), et 256 est le nombre total de permutations. Vos chances d'obtenir exactement quatre tentatives correctes sont de 70/256.

Comment faire pour connaître le nombre de chances pour plusieurs nombres de tentatives réussies ? Dans la ligne du bas, pour une série de huit tentatives, quelles sont les chances de réussir six tentatives ou plus ? Vous devez additionner $28 + 8 + 1$ pour obtenir 37/256, soit à peu près 14 %. Vous ne devez donc espérer que cela se produise, par pure chance, qu'environ une fois sur sept.

La puissance du triangle

Si vous avez approfondi l'étude des mathématiques, vous reconnaîtrez un triangle de Pascal sur la fig. 39-9. Je n'ai pas assez de place pour développer ce sujet ici. L'un des aspects intéressants de ce triangle est que chaque nombre du triangle (sauf les 1) peut résulter de l'addition des deux nombres qui le surplombent. En théorie, si vous voulez réaliser un essai comportant 1 000 tentatives, étendez simplement le triangle de Pascal vers le bas jusqu'à obtenir la ligne où le deuxième nombre est 1 000. Vous pourrez alors savoir le nombre de chances d'obtenir des tentatives réussies entre 0 et 1 000.

Dans le triangle de Pascal, les nombres deviennent rapidement très grands, ce qui est un problème. Un langage de programmation usuel est même incapable de les manipuler. Supposez que vous disposez d'un langage de programmation vous permettant de manipuler des nombres entiers quadruples, c'est-à-dire des nombres entiers représentés par 32 digits binaires. En notation décimale, un entier quadruple peut atteindre une valeur de plus de trois billions (plus ou moins).

Mais cela ne suffirait que pour calculer les 32 premières lignes du triangle de Pascal. La grandeur des nombres dans un triangle de 1 000 lignes représente un véritable challenge.

Les probabilités de John Walker

Par chance, je n'ai pas à m'en préoccuper, car une personne astucieuse, John Walker, s'en est chargée pour moi. En outre, il a mis les résultats en ligne. Walker est le fondateur d'Autodesk, qui a commercialisé le premier logiciel sérieux de conception assistée par ordinateur utilisant MS-DOS. Il s'intéressait également aux phénomènes paranormaux et continue à s'y intéresser pendant son temps libre.

Sur les pages qu'il a créées à l'adresse <http://www.fourmilab.ch/rpkp/experiments/bincentre.html>, une table de probabilités présente les chances de deviner correctement sur un total de 1024. Par exemple, il y a environ 2,5 % de chances de deviner correctement la moitié des bonnes réponses (512 sur 1024).

Pourquoi ce nombre n'est-il pas plus élevé ? Parce que vous pouvez presque autant de fois deviner correctement 511 ou 513 fois. Ce qui importe, encore une fois, c'est l'étendue.

Par exemple, quelles sont les chances d'obtenir 562 bonnes réponses ou plus, soit 50 fois plus que la moyenne ou davantage ? Walker a pensé qu'il serait utile de pouvoir répondre à ce genre de questions, c'est pourquoi sa table comprend les probabilités accumulées, indiquant les chances d'obtenir un certain nombre de tentatives réussies ou davantage. Pour 562 tentatives réussies, ou plus, les chances sont d'environ 0,098 %. Ceci signifie que vous avez une chance sur 1019 d'y parvenir (selon la table).

Supposez que cela arrive. Pourriez-vous penser que vous avez un certain pouvoir paranormal ? Hum, je ne sais pas. Conclure une action ayant une chance sur mille de réussir est inhabituel, mais, par définition, cela pourra arriver, par chance, uniquement une fois sur mille ! En suivant le même raisonnement, je pourrais dire qu'une personne qui gagne une importante somme d'argent au casino est également dotée d'un pouvoir divinatoire.

Quoi qu'il en soit, les probabilités de la table de Walker diminuent rapidement avec l'augmentation du nombre de tentatives. Par exemple, on remarque que si vous parvenez à réussir 600 tentatives, ou davantage, sur

1024, les probabilités que cela arrive sont de 1 sur 491 007. En d'autres termes, vous devez effectuer plus de 50 millions d'essais pour espérer en obtenir un dans lequel vous réussirez 600 tentatives ou plus, par simple chance. Si vous y parvenez, je serais impressionné, car, vous le savez, 1 chance sur 50 millions est à peu près la probabilité de gagner le gros lot à la loterie. Dois-je en conclure pour autant que les gagnants du jackpot de la loterie sont tous devins ?

Vous voyez le problème. Après avoir tant peiné pour réaliser un générateur de nombres aléatoires uniformément pondéré, il est toujours difficile de prendre au sérieux une exception à la règle. Même si vous réussissiez les 1024 tentatives, il pourrait ne s'agir que d'une question de chance, bien que ce soit peu probable.

Malgré tout, vous tester vous-même pourrait être amusant. Peut-être pensez-vous que 1024 est une quantité un peu grande, mais si vous faites une tentative toutes les trois ou quatre secondes, cela ne vous prendra qu'environ une heure. Vous ne serez peut-être jamais en mesure de prouver sans conteste que vous avez des pouvoirs divinatoires, mais que penserez-vous si votre score est dans la moyenne ? Cela sera de toute façon, un résultat intéressant qui sera une forte

présomption que vous ne détenez pas de capacités paranormales !

Cela soulève une question intéressante. Que préférez-vous : être devin ou pas ?

À ce sujet, après réflexion, j'ai décidé que j'aimerais mieux vivre dans un monde où les pouvoirs paranormaux n'existent pas. Simplement parce que je préfère l'idée qu'il existe une explication rationnelle à toute chose.

Je suis un grand adepte du rationnel. Après tout, un raisonnement logique est toujours en marge des théories valides de l'histoire scientifique. Des investigations rationnelles confirment toutes ces théories, les mathématiques étant la discipline la plus rationnelle qui permet aux ingénieurs de les appliquer. Chaque pont, chaque bâtiment, chaque voiture, avion, véhicule spatial ou ordinateur s'appuie sur les mathématiques pour sa conception.

Quand je regarde les réalisations merveilleuses et inimaginables qui ont été créées grâce à la logique du raisonnement humain, je pense que, même si quelques pouvoirs divinatoires existent, ils ne sont, finalement, pas si impressionnants que ça !

Conclusion

Le temps (et le manque de place !) est venu de clore ce livre. Nul doute qu'il y aurait encore d'autres sujets à traiter ici, mais j'ai préféré me limiter à ceux qui forment un ensemble cohérent. Tous les composants et concepts de base ont été développés d'un projet à l'autre, que ce soient les phototransistors, les diviseurs de tension, les comparateurs, les compteurs, les multiplexeurs, l'hystérésis, les portes logiques, les phénomènes aléatoires, les timers ou encore les capteurs. Avec un peu d'imagination, vous êtes maintenant en mesure d'utiliser ces dispositifs et ces techniques au sein de vos propres montages.

Je tiens à préciser que plusieurs collaborateurs d'un haut niveau d'études ont vérifié la véracité du contenu de cet ouvrage. Personnellement, je n'ai aucune qualification et il me semble légitime de vous informer que j'ai acquis les connaissances nécessaires à l'écriture de ce livre sans suivre de formation spécifique.

Je suis conscient que cette méthode d'apprentissage peut ne pas convenir à tout le monde. Je sais aussi que l'auto-apprentissage a tendance à limiter le champ de compréhension d'un sujet. Cependant, si j'ai pu acquérir suffisamment de connaissances pour écrire des livres d'électronique, je suppose que ce que j'appelle « l'apprentissage par la pratique » pourrait également vous satisfaire.

Nous avons tous fait l'expérience de lire un livre, en particulier à la veille d'un examen, avant de tout oublier ou presque quelques semaines plus tard. Je pense que l'expérience est très différente quand vous cherchez des informations que vous mettez ensuite en pratique pour construire votre projet : vous apprenez en observant ce qui se passe. Le savoir-faire est gravé dans votre mémoire.

De plus, quand vous êtes forcé d'agir de votre propre initiative pour résoudre un problème, sans l'aide de quiconque, vous développez votre capacité d'innovation.

L'approche expérimentale est une grande tradition dans la longue histoire de la technologie.

Si, grâce à ce livre, vous vous sentez paré pour cette approche, si vous vous estimez capable d'ouvrir un appareil, de comprendre comment il fonctionne, de le réparer, de le détourner de son usage premier, de le modifier ou de l'améliorer, alors vous avez acquis de grandes compétences et aiguisé votre esprit d'analyse. Et j'aurais atteint mon objectif.

Pour moi, c'est une finalité. Pour vous, j'espère que c'est un point de départ.

Charles Platt

Principaux fournisseurs et liste du matériel

ANNEXE

Selon votre budget et vos préférences, le matériel nécessaire aux expériences de ce livre ne sera pas forcément le même. Voici les quatre listes possibles de matériel :

1. **Matériel de base.** Si vous désassemblez chaque montage une fois l'expérience finie, vous pourrez réutiliser les composants et économiser ainsi sur leur coût. Cette liste considère que vous procédez de cette façon, en recyclant pratiquement tout. Voir la section « Matériel de base pour les expériences 1 à 14 », page 311.
2. **Matériel recommandé.** Si vous souhaitez conserver quelques montages décrits dans ce livre, c'est la liste qu'il vous faut. Voir la section « Matériel recommandé pour les expériences 1 à 14 », page 313.
3. **Matériel complet.** Cette liste contient tous les composants requis pour assembler et conserver chaque montage proposé dans cet ouvrage. Elle comprend également quelques composants supplémentaires pour remplacer ceux qui seraient endommagés ou grillés. Voir la section « Matériel complet pour les expériences 1 à 14 », page 317.
4. **Matériel pour chaque expérience.** Si vous préférez acheter les composants en petites quantités ou par projet, consultez cette liste qui recense le matériel, expérience par expérience. Voir la section « Matériel pour chaque expérience », page 320.

Les trois premières listes sont subdivisées en sous-listes pour les expériences 1 à 14, 15 à 25, et 26 à 36.

Sources d'approvisionnement

Revendeurs en ligne spécialisés

La règle la plus importante est de tester plusieurs fournisseurs. Nous vous conseillons les sites suivants pour l'achat de composants en ligne :

- <http://www.selectronic.fr/>
- <https://web1.ibcfrance.fr/>
- <http://www.conrad.fr/ce/>
- <http://www.digikey.fr/>
- <http://www.mouser.fr/>
- <http://fr.farnell.com/>
- <http://fr.rs-online.com/>
- <http://www.cyclades-elec.fr>

Si l'un de ces fournisseurs est en rupture de stock pour un composant, vous le trouverez souvent chez l'un de ses concurrents.

Sachez que Sélectronic, Cyclade Électronique et Conrad sont des magasins destinés aux amateurs d'électronique et qu'ils auront, en général, les composants qui vous intéressent. Mais ils n'offrent pas un catalogue aussi diversifié et complet que Mouser, Farnell ou Digikey.

Je suis conscient que la recherche de composants en ligne prend du temps, même en filtrant les résultats. C'est pourquoi vous devriez également posséder un catalogue papier. Le catalogue Sélectronic, en particulier, possède un excellent index et permet une recherche plus rapide qu'en ligne.

Notez que Mouser et Digikey permettent de télécharger leurs catalogues, par rubrique.

Autres sources

eBay est un site incontournable pour trouver des composants qui sont rares ou obsolètes. C'est aussi une excellente source d'approvisionnement pour les composants sophistiqués les plus récents, comme les dispositifs d'éclairage à LED. Des composants génériques comme les résistances ou les LED y sont également proposés.

Ne craignez pas d'acheter auprès de vendeurs asiatiques expédiant par avion. J'ai commandé en Chine, au Cambodge ou en Thaïlande, sans aucun problème. Les descriptions sont précises, les prix relativement bas et les expéditions en généralement fiables, mais vous devrez attendre environ deux semaines pour la réception des colis. Sur les sites suivants, vous trouverez ainsi de nombreux composants, ainsi que des platines d'essais et des capteurs sur circuit imprimé de test :

- www.aliexpress.com
- www.dx.com

Composants génériques

Dans les listes de matériel, vous verrez que je ne me suis pas soucié de préciser le type des LED à acheter, ni la marque des résistances, car ce sont des composants génériques. Je ne me suis pas non plus donné la peine de préciser la tension de service des condensateurs, car dans ce livre, nous n'utilisons aucun condensateur prévu pour une tension supérieure à 16 VDC.

Voici ce que vous devez savoir pour acheter vous-même vos composants.

Résistances

Peu importe le fabricant, la longueur des fils de connexion est sans importance. Les résistances d'un quart de watt de puissance nominale sont les plus courantes et conviendront. Les résistances d'un huitième de watt sont plus petites, mais vous devrez vous assurer qu'elles ne sont pas soumises à une surcharge dans vos applications. Certaines personnes pourront trouver les résistances de 1/8 W trop petites pour être facilement utilisées et celles de 1/2 W trop encombrantes sur une plaque de montage.

Une tolérance de 10 % est acceptable, de plus, les anneaux de couleurs sont plus faciles à lire que ceux des résistances de tolérances 5 % ou 1 %. Vous pouvez cependant acheter des résistances de 1 %, si vous le souhaitez.

La fig. A-1 indique la racine des valeurs usuelles en électronique pour les condensateurs et les résistances. Par exemple, les résistances de 1K, 1K5 sont communes, tout comme celles de 10K ou 15K, 100 Ω et 150 Ω . Les valeurs en noir sont moins courantes.

1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8
1.1	1.6	2.4	3.6	5.1	7.5
1.2	1.8	2.7	3.9	5.6	8.2
1.3	2.0	3.0	4.3	6.2	9.1

Figure A-1 Les valeurs de base des résistances et condensateurs sont indiquées en blanc sur fond bleu sur la ligne du haut. Les autres valeurs, en noir, concernent la gamme des résistances de tolérance 5 %.

Dans le passé, la plupart des résistances et presque tous les condensateurs avaient une précision de plus ou moins 20 %, une résistance de 1K pouvait avoir une valeur maximale de $1 + 0,2 = 1K2$, une résistance de 1K5 pouvait avoir une valeur aussi faible que $1,5 - 0,3 = 1K2$. Il était donc inutile d'avoir des résistances de valeur intermédiaire comme par exemple 1K4, car sa valeur pouvait se trouver parmi les valeurs d'une résistance de 1K. À l'inverse, si une résistance avait une valeur nominale de 1K7, au lieu de 1,5K, il y aurait un trou dans la gamme des valeurs.

Les six valeurs en blanc sur la ligne du haut de la table de la fig. A-1 sont les valeurs de base d'origine des composants de tolérance 20 %. Ces sont toujours les valeurs les plus fréquentes, bien que les résistances de 5 % soient devenues courantes. Les valeurs de base supplémentaires sont indiquées, en noir, dans les lignes suivantes du tableau.

Pour la plupart des projets, vous n'avez pas besoin de toutes ces valeurs à 5 %. Vous pouvez simplement vous limiter aux six valeurs en blanc. Je les ai utilisées tout au long de ce livre, afin que vous n'ayez pas à acheter inutilement une grande diversité de résistances.

Vous trouverez, sur la fig. A-2, la liste des valeurs à acheter pour vous constituer un stock de résistances. Les quantités indiquées seront suffisantes pour tous les projets de ce livre, avec à peu près la moitié en plus. Si vous

vous demandez pourquoi les valeurs 220 Ω et 10K sont plus nombreuses que les autres, c'est uniquement parce qu'elles sont utilisées comme résistances série pour les diodes LED et comme résistances de rappel des entrées des circuits intégrés logiques.

Vous pouvez, aussi, dépenser un peu moins en achetant des assortiments préconditionnés, plutôt que ces valeurs spécifiques, en faible quantité car les prix des résistances chutent vite en les achetant en masse.

Valeur de résistance	Quantité	Valeur de résistance	Quantité	Valeur de résistance	Quantité	Valeur de résistance	Quantité
22	10	1K	40	10K	150	100K	60
47	10	1,5K	10	15K	10	150K	10
100	60	2,2K	20	22K	10	220K	10
220	150	3,3K	50	33K	10	330K	10
330	50	4,7K	30	47K	10	470K	10
470	60	6,8K	10	68K	20	680K	10
680	40					1M	10

Figure A-2. Cette table indique les quantités de résistances suffisantes pour l'ensemble des projets de ce livre, augmentées 50 % au minimum. Toutes les valeurs sont exprimées en ohms, sauf indication contraire (K=kilohms, M=mégohms).

Vous ne devez pas nécessairement acheter les quantités exactes indiquées dans ce tableau. Vous pourrez par exemple trouver des assortiments tout prêts, comprenant des résistances de ces valeurs, par quantité de dix. Vous pourrez compléter individuellement les plus grandes quantités.

Condensateurs

Toutes les marques conviendront. Les condensateurs à fils radiaux sont préférables. Une tension de service minimale de 16 V DC est nécessaire. Des tensions plus élevées conviendront également. Les condensateurs en céramique multicouches sont préférables. Pour les valeurs supérieures à 10 μ F, les condensateurs en céramique deviennent plus coûteux, les condensateurs électrolytiques sont acceptables.

Un assortiment de condensateurs à garder en réserve est suggéré sur la fig. A-3, les quantités suffisantes

pour ce livre ont été majorées de 50 %. Préférez les condensateurs en céramique pour les valeurs des trois premières colonnes de ce tableau. Pour des raisons purement économiques, vous utiliserez probablement des condensateurs électrolytiques pour les valeurs supérieures à 10 μ F.

	0		30	1	0	1	30
	0			1		1	10
	10				10		10
	0		0				10
	10					1	10
	10		0				10

Figure A-3. Liste de valeurs recommandées pour les condensateurs à avoir sous la main, les quantités, suffisantes pour les projets de ce livre, ont été augmentées de 50 %.

Depuis les années 1990, les condensateurs multicouches en céramique sont devenus bien plus petits et moins coûteux, et leur durée de vie les rend attractifs. Les condensateurs électrochimiques équivalents sont plus gros et leur durée de vie en stockage moins importante, bien que ce soit sujet à discussion.

De nombreux spécialistes attirent l'attention sur le fait que les condensateurs électrolytiques doivent être reliés périodiquement à une source de tension, afin de réactiver leurs composants chimiques internes. J'ai cependant des condensateurs électrolytiques qui ont été stockés plus de 15 ans et qui semblent fonctionner parfaitement. Qui dois-je croire : mon expérience ou les experts ? Je ne sais pas, mais ce problème n'arrive pas avec les condensateurs en céramique.

Les condensateurs en céramique sont rarement marqués correctement, ce qui est un problème. Vous pouvez vérifier leur capacité à l'aide de votre multimètre, s'il prévoit cette possibilité. De nombreux multimètres ne peuvent cependant pas mesurer des valeurs supérieures à 20 μ F et ils ne pourront pas vous indiquer la tension de service d'un condensateur.

Vous devrez faire attention en marquant les boîtes de ces composants, et une fois que vous en aurez pris un pour une expérience, vous oublierez probablement sa

tension de service. Pour cette raison, il sera préférable d'acheter des condensateurs ayant la même tension de service. Une tension nominale minimale de 16 V DC est acceptable. Il faut garder à l'esprit qu'un condensateur ne doit jamais être utilisé au-delà d'un quart de sa tension de service nominale.

LED

Tous les fabricants en conviendront. Les LED se présentent sous un nombre impressionnant de formes et de tailles, le type le plus courant appelé « standard à fils » étant celui dont vous avez besoin.

Vous constaterez souvent dans ce livre que j'utilise des LED pour vérifier le fonctionnement d'un circuit. Les LED de diamètre 3 mm sont parfaites pour cet usage, car vous pourrez les aligner entre deux colonnes adjacentes de votre platine de montage.

Les LED de diamètre 3 mm sont parfois identifiées par « taille T-1 ».

Choisissez vous-même la couleur, l'intensité lumineuse, l'angle de visualisation et l'enrobage clair ou transparent. Un courant maximal direct de 10 mA est préférable pour les LED commandées par les sorties des circuits intégrés de la série 74HC00. Une tension directe de 2 V DC est courante.

Les LED Kingbright WP132X*D appartiennent à cette catégorie, l'astérisque doit être remplacée par une lettre indiquant la couleur. Par exemple, les WP132XGD sont vertes. La référence Vishay TLHK4200 est comparable. Ces LED ou leurs équivalents vous coûteront environ 15 centimes d'euro, voire moins si vous les achetez en grand nombre.

Pour économiser les piles, il sera préférable d'utiliser des LED ayant une intensité de fonctionnement de 2 mA pour indiquer l'état des sorties d'un circuit en cours de test. Leur brillance relativement faible ne sera pas un problème lorsque vous devrez uniquement vérifier qu'un circuit fonctionne.

LED à résistance incorporée

Ce type de composant comporte une résistance de valeur appropriée à une certaine tension de fonctionnement, évitant la présence d'une résistance externe. Ces LED sont très pratiques pour les réalisations sur

platines de montage et fortement recommandées, si vous consentez à payer le double du prix d'une LED conventionnelle. La référence Vishay TLR*4420CU, où l'astérisque renvoie à une lettre spécifiant la couleur, est un exemple prévu pour une tension de 12 V DC, mais elle peut être utilisée sous une tension de 9 V DC ou même 5 V DC. Les références Chicago 4302F1-12V, 4302F3-12V et 4302F5-12V (respectivement rouge, ambre et verte) conviendront également mais à un prix légèrement plus élevé.

Les séries Avago HLMP-1620 et HLMP-1640 sont prévues pour une tension de 5 V DC. Personnellement, j'ai acheté des LED prévues pour une tension de 12 V DC, ce qui me permet de les utiliser dans les circuits fonctionnant sous 9 V DC ou 5 V DC.

Quand je préconise des LED génériques dans les listes de matériel, il s'agit d'un type courant sans résistance incorporée, qui doivent être protégées par une résistance externe.

Attention aux résistances série

La plupart des photos des montages de ce livre montrent des LED avec résistances incorporées. Si vous utilisez des LED génériques sans résistance interne, n'oubliez pas d'ajouter vos propres résistances en série.

Si une LED ne possède pas de résistance intégrée, une résistance de 470 Ω conviendra pour un circuit sous 9 V DC, tandis qu'une valeur de 220 Ω sera préférable pour un circuit alimenté sous 5 V DC.

Des résistances d'un quart de watt pourront être utilisées, considérant une chute de tension aux bornes de la résistance, de 7 V sous 15 mA, pour un circuit alimenté sous 9 V DC. Ceci représente une puissance dissipée d'environ 100 mW, ce qui est inférieur à la moitié de la puissance nominale de la résistance.

Pour un circuit que vous souhaitez conserver, vous pourrez préférer utiliser des LED plus brillantes. Leurs spécifications variant, il est de votre responsabilité d'utiliser une résistance série en accord avec les caractéristiques de leurs fiches techniques.

Circuits intégrés

Tous les fabricants sont acceptables. Le boîtier d'un circuit intégré correspond à sa taille physique et ses caractéristiques doivent être considérées attentives.

ment avant de commander. Tous les circuits intégrés logiques doivent être en boîtier DIP (signifiant *Dual Inline Package*, comportant deux rangées de broches espacées de 2,54 mm). Ils peuvent également être identifiés en boîtier PDIP (*Plastic DIP*), pour ceux en plastique. Ils sont décrits « traversants », leurs broches entrant dans les trous des circuits imprimés. Le sigle DIP est suivi par le nombre de broches, par exemple DIP-14 ou DIP-16. Ce nombre peut être ignoré.

Les circuits intégrés montés en surface ont un type de boîtier commençant par la lettre S, comme SOT, SSOP. N'achetez pas de composants dont le type de boîtier commence par S, vous ne pourriez pas le utiliser.

La famille de circuits intégrés 74HC00 est recommandée (*High Speed CMOS*), par exemple les circuits 74HC00 ou 74HC08 ou présentant des identifications génériques similaires. Ces références peuvent comprendre des lettres additionnelles, préfixes ou suffixes, ajoutés par les fabricants, comme dans la référence SN74HC00DBR (de Texas Instruments) ou WC74HC00ADG (de chez On Semiconductor). Pour nos besoins, ces versions sont fonctionnellement identiques. Si vous observez attentivement, vous trouverez la référence générique 74HC00 incluse dans chaque référence spécifique d'un fabricant.

Certaines sources informent que la série HC ne peut fournir qu'un courant de 4 mA à 6 mA mais les informations des constructeurs (par exemple la note d'application N° 313 de Fairchild Semiconductor) indiquent expressément qu'une intensité atteignant 25 mA sera sans dommage pour les circuits intégrés de la série HC. Il faudra toutefois limiter le courant fourni à une LED par un circuit pilotant d'autres circuits à une intensité plus sûre de 10 mA, car la tension de sortie d'un circuit logique sera diminuée par des courants importants. Si la tension passe sous la barre des 3,5 V DC, un autre circuit pourrait ne pas reconnaître cette tension en tant que niveau haut. Une tension minimale de 4 V DC est préférable.

Les circuits intégrés logiques peuvent être achetés dans les sites des vendeurs en recherchant simplement leur référence générique (par exemple, 74HC86 pour un quadruple circuit XOR). En général, les lettres ou les nombres additionnels d'identification des fabricants peuvent être ignorés, pourvu que le circuit soit bien prévu pour fonctionner sous une alimentation de 5 V DC. Les caractéristiques mentionnent souvent 2 V à 6 V pour les circuits intégrés de la série HC.

Dans certains cas, les circuits intégrés de l'ancienne série 4000B ont des fonctions inexistantes dans la série 74HC00. Par exemple, un circuit OR à quatre entrées n'existe pas dans la série HC, mais le 4072B comporte deux portes OR à quatre entrées.

Les circuits intégrés de la série 4000B peuvent remplacer les circuits de la famille HC si le courant plus faible qu'ils doivent fournir ou absorber est acceptable. La plupart des circuits de la série 4000B sont prévus pour s'interfacer avec d'autres circuits logiques, mais pas pour piloter des LED.

La fig. A-4 indique la plage des tensions hautes et basses admissibles, des circuits intégrés des séries 4000B et HC. Vous constaterez que ces circuits n'ont aucun problème pour communiquer entre eux.

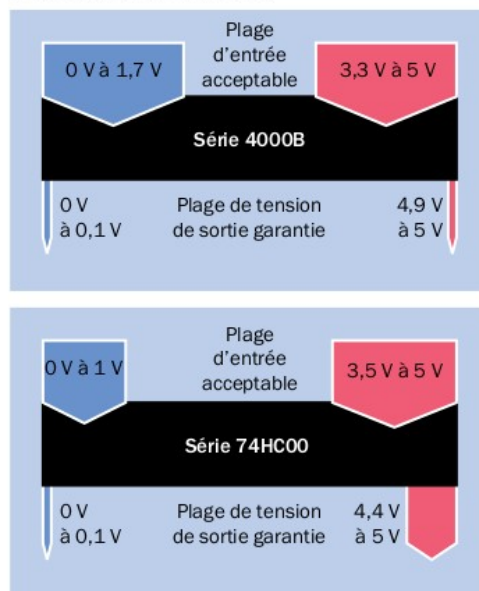


Figure A-4. Tensions d'entrée acceptables et tensions de sortie garanties, pour un courant absorbé ou fourni de 4 mA pour la série HC et 0,5 mA pour la série 4000B. Un courant plus important réduira la tension de sortie.

Les circuits intégrés TTL, tels que la série 74LS00, posent quelques problèmes de compatibilité. Ils ne sont ni recommandés, ni utilisés dans aucun des projets de ce livre.

Transistors

À titre de simplification, un seul type de transistor est utilisé dans ce livre : il s'agit du 2N2222. La référence générique de ce composant est souvent préfixée par les fabricants avec la lettre P comme PN2222 ou PN2222A, ou encore, PN2222ATFR. Les lettres en début de référence n'ont aucune importance.

Faites attention de ne pas acheter un P2N2222, même si le moteur de recherche du vendeur vous le suggère comme substitut. Dans le cas de ce composant, le préfixe P2 revêt une grande importance. Les fils de liaison du P2N2222 sont inversés par rapport aux autres modèles. Cela pourrait créer confusion et frustration, et vous faire perdre beaucoup de temps.

Interrupteurs

Quatre types d'interrupteurs sont fréquemment utilisés dans les projets de ce livre : les interrupteurs tactiles, les boutons-poussoir, les interrupteurs DIP (dipswitchs) et les inverseurs.

Les interrupteurs tactiles

Ce sont de très petits boutons-poussoir pouvant être insérés dans une plaque de montage (ou une plaque d'essais perforée, si vous préférez). Les fabricants et modèles choisis n'ont en général aucune importance, tant que l'interrupteur est de type « traversant » et pas à monter en surface. Ses broches doivent correspondre aux trous des plaques de montage, qui sont espacés de 2,54 mm.

Les interrupteurs tactiles les plus courants font 6 mm de côté, ils sont souvent identifiés comme interrupteurs 6 × 6 dans les catalogues de composants. Ils possèdent quatre broches reliées ensemble deux par deux à l'intérieur du composant car il s'agit d'un interrupteur de type SPST, même s'il peut ressembler à un modèle ayant deux paires de contacts.

Pour les projets de ce livre, je préfère les interrupteurs tactiles de demi-taille 3,5 × 6 mm. Ils n'ont que deux broches et n'occupent qu'une colonne sur votre platine de montage. Par exemple, les références TS4311T5201 ou TS4311T1601 de la série Mountain Switch TS4311T ne diffèrent que par la couleur de leur bouton et la pression qui doit être appliquée pour fermer leurs contacts.

Les interrupteurs à bouton-poussoir

Utilisés dans plusieurs projets, ils sont de type DPDT, 4PDT ou 6PDT, selon l'application. Ils peuvent être soit de type momentané revenant à leur position initiale lorsqu'on lâche leur poussoir, soit à verrouillage, revenant à leur position initiale en appuyant une seconde fois sur leur poussoir.

C'est une question de préférence, vous choisirez en lisant les descriptions des projets, afin de voir la façon dont l'interrupteur doit être utilisé. N'importe quelle marque d'interrupteurs convient, pourvu qu'ils soient de type traversants avec des broches à souder. Essayez d'en trouver avec des broches espacées de 2,54 mm. Il s'agit par exemple de la série ALPS SPUJ. La série E-Switch PBH peut également être utilisée, comme la référence PBH4U0ANAGX, dans laquelle le nombre 4 identifie le nombre de pôles.

Notez que les interrupteurs poussoirs sont vendus sans leurs boutons. Vous devez les choisir séparément, ce qui vous permet un choix parmi plusieurs couleurs, formes et dimensions.

Les interrupteurs DIP (dipswitchs)

Ce sont des composants de format *Dual inline* pouvant se placer sur la séparation centrale d'une plaque de montage. Leur nombre de positions correspond au nombre d'interrupteurs miniatures individuels. Chacun est de type SPST. Ce composant doit avoir un espace entre broches de 2,54 mm, être de type traversant ou pour montage sur circuit imprimé, ou à broches à souder, de façon à pouvoir s'intégrer à votre platine de montage.

La série BD de C&k Switches est un exemple typique, dont les références indiquent le nombre de positions de chaque composant. La référence BD02 comporte ainsi deux interrupteurs ; la référence BD04 en contient quatre.

Les interrupteurs à levier (ou à bascule)

Dans ce livre, ils ne sont utilisés que pour couper l'alimentation 5 V DC ou 9 V DC des circuits. Vous aurez besoin d'un type SPST ou d'un type SPDT de type traversant ou ayant des broches à souder, ou de type à souder sur circuit imprimé, pourvu que leurs broches soient espacées de 2,54 mm, ou de 5,08 mm. La référence Mountain Switch 108-2MS1T2B3M2QE-EVX en est un exemple. Les interrupteurs à bascule ne sont pas

souvent utilisés dans les projets décrits ici, vous pouvez acheter les plus petits et les moins chers que vous trouverez.

Alimentation, plaques de montage et câblage

Chaque projet nécessite soit une alimentation de 9 V DC (qui peut être fournie par une pile), soit une alimentation régulée de 5 V DC (voir la section « Source d'alimentation » de l'introduction, page 1).

Si vous souhaitez conserver certains projets dans leur forme définitive, je vous laisse décider du nombre d'alimentations nécessaires. N'oubliez pas d'acheter un connecteur à clips pour chaque pile de 9 V.

Deux à trente plaques de montage seront nécessaires selon le nombre de projets que vous désirez conserver. (Deux projets sont trop importants pour être réalisés sur une seule platine de montage et en nécessitent deux, ce qui explique le nombre minimal indiqué). Les plaques de montage que je vous recommande sont très économiques, vous les trouverez facilement chez les vendeurs asiatiques, sur eBay. Je m'en suis procuré pour moins de 10 euros, frais d'envoi compris.

La section « Câblage » de l'introduction page 3 décrit également les différents fils de liaison et fils de pontage.

Nous en avons terminé pour les recommandations d'achat, passons maintenant aux listes de matériel.

Matériel de base pour les expériences 1 à 14

Voir la section précédente « Composants génériques » page 306 pour les recommandations d'achat des composants génériques (résistances, condensateurs, LED, circuits intégrés logiques et interrupteurs).

Toutes les quantités dans les listes qui suivent sont indiquées entre parenthèses. Si rien n'est mentionné, la quantité est égale à 1.

Alimentation

- Piles de 1,5 V (2)
- Pile de 9 V et son connecteur à clips
- Une alimentation 5 V DC, nécessitant un régulateur de tension LM7805, ainsi que deux conden-

sateurs, une résistance et une LED (comptabilisés ci-dessous)

- Adaptateur secteur de 10 V DC à 12 V DC pour l'installation définitive de l'expérience 7

Résistances

- 22 Ω , 47 Ω , 100 Ω , 220 Ω (2), 470 Ω (5), 1K (3), 1K5, 2K2 (10), 3K3, 4K7 (2), 10K (4), 33K, 68K (2), 100K (10), 150K (2), 220K (2), 1M (2)

Condensateurs

- 0,01 μ F (2), 0,047 μ F, 0,068 μ F, 0,1 μ F (3), 0,33 μ F (3), 0,68 μ F (2), 1 μ F (5), 10 μ F (3), 15 μ F, 47 μ F, 100 μ F, 220 μ F, 330 μ F

Interrupteurs

- À levier (SPST ou SPDT)
- Tactile

LED

- 3 mm générique (4)

Potentiomètres ajustables

- 5K, 10K, 500K (2), 1M

Transistors

- 2N2222 ou PN2222 (3)

Circuits intégrés

- 555 timer, de type ancien, bipolaire (2)
- LM339 comparateur
- LM741 amplificateur opérationnel
- LM386 amplificateur de puissance

Capteurs

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche
- Microphone (électret, de type générique à deux fils)

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée
- Buzzer 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA maximum

Autres

- Pincres crocodiles (2)
- Cordons de liaison avec pincres crocodiles à chaque extrémité (3)
- Pièce de carton ondulé de 15 x 30 cm minimum (1 pièce)
- Colle blanche Elmer ou similaire (quantité minimale)
- LM7805 régulateur de tension
- LM7806 régulateur de tension
- UA78M33 régulateur de tension
- 1N4001 diode de redressement (2)
- Relais à verrouillage DS1E-SL2-DC3V ou similaire de type SPDT ou DPDT avec une bobine de 3 V DC, pouvoir de coupure de 2 A
- Réveil digital alimenté par deux piles de 1,5 V

Je considère que vous avez déjà acheté le matériel de base pour les expériences 1 à 14, et que ces composants peuvent être réutilisés pour les expériences 15 à 25. Les quantités suivantes sont donc des compléments à celles que vous devez déjà posséder.

Matériel de base pour les expériences 15 à 25

Résistances

- 100 Ω (9), 220 Ω (8), 330 Ω (6), 470 Ω (2), 3K3, 10K (15)

Condensateurs

- 0,001 μ F (2)

Interrupteurs

- Tactile (5)
- Poussoir SPDT

- Poussoir DPDT (3)
- Poussoir 4PDT (6)
- Poussoir 6PDT (2)
- Capuchon pour poussoir (9)
- DIP 4-positions (2)
- DIP 8-positions (2)

LED

- 3 mm générique (16)

Potentiomètres ajustables

- 1K, 50K

Circuits intégrés

- 74HC08 quadruple AND à deux entrées (2)
- 74HC32 quadruple OR à deux entrées
- 74HC02 quadruple NOR à deux entrées
- 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (2)
- 74HC4075 triple OR à trois entrées
- 74HC4002 Double NOR à quatre entrées
- 74HC4514, ou 4514B décodeur
- 74HC237 décodeur (2)
- 4067B multiplexeur
- 4520B compteur
- 74HC148 encoder (2)
- 74HC11 triple AND à trois entrées

Capteurs

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée
- Buzzer 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA max (2)

Autres

Plaque perforée sans pistes de cuivre (1 pièce de 15 × 15 cm minimum)

Composants optionnels

- Câble ruban multicolore (60 cm environ)
- Poussoir 3PDT
- Poussoir DPDT (3)
- Poussoir SPDT (3)
- Capuchon pour poussoir (7)

Matériel de base pour les expériences 26 à 36

Résistances

- 220 Ω (14), 100K (2)

Condensateurs

- 47 pF, 68 pF, 100 pF, 0,0001 μF, 0,01 μF (2), 0,033 μF, 22 μF

LED

- 3 mm générique (25), ou (10) si des bargraphes (36) sont utilisés dans l'expérience 28
- 5 mm générique (16)

Potentiomètres ajustables

- 1K, 2K, 100K

Circuits intégrés

- 7555 timer (3)
- 74HC4017 compteur (3)
- 74HC164 registre à décalage (3)
- 4078B OR/NOR à huit entrées
- 74HC7266 quadruple XNOR à deux entrées
- 74HC30 NAND à huit entrées

Capteurs

- Interrupteur Reed SPST de n'importe quel type

- Capteur à effet Hall bipolaire ATS177 ou similaire (2), et capteur à effet Hall unipolaire, ou linéaire, ou omnipolaire (optionnel)
- Capteur à infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire
- Thermistance de 100K
- Encodeur rotatif Bourns ECW1J-B24-BC0024L ou similaire de 24 pas par rotation et 24 détentes, à sortie en quadrature (2)

Autres

- Fils de liaison flexibles (35)
- Petit aimant d'environ 7 × 7 × 40 mm ou barre aimantée miniature en néodyme d'environ 7 × 1,6 × 13 mm
- Lests en plomb (2) et fil étamé (environ 30 cm) selon description de l'expérience 33.

Composants optionnels

- Barrettes de connexions mâles (33)
- Barrettes de connexions femelles (33)
- Bargraphes (36) et réseaux Darlington ULN2003 (3), si vous réalisez la version finale de l'expérience 28
- Bille magnétique, tube d'aluminium et aimants en anneau(4), selon description de l'expérience 29
- 330 Ω (16), 680 Ω (16), 3K3 (16), LED 5 mm (16), capteur infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire (16) et réseau Darlington ULN2003 (3), si vous réalisez la version définitive de l'expérience 31

Matériel recommandé pour les expériences 1 à 14

Voir la section précédente « Composants génériques » page 306 pour les recommandations d'achat des composants génériques (résistances, condensateurs, LED, circuits intégrés logiques et les interrupteurs).

Dans les listes suivantes, toutes les quantités sont indiquées entre parenthèses. Si rien n'est mentionné, la quantité est égale à 1.

Alimentation

- Piles de 1,5 V (2)

- Piles de 9 V et leurs connecteurs (5 max.)
- Adaptateur secteur fixe de 10 V DC à 12 V DC sous 1 A minimum.
- Une alimentation 5 V DC, nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :
 - LM7805 régulateur de tension
 - Résistance de 2K2
 - Condensateurs de 0,33 μ F et 0,1 μ F
 - Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
 - LED générique de 3 mm

Résistances

- 22 Ω (5), 47 Ω (5), 100 Ω (5), 220 Ω (5), 470 Ω (10), 1K (10), 1K5 (5), 2K2 (10), 3K3 (5), 4K7 (5), 10K (15), 33K (5), 68K (5), 100K (20), 150K (5), 220K (5), 1M (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- 0,01 μ F (10), 0,047 μ F (5), 0,068 μ F (5), 0,1 μ F (5), 0,33 μ F (5), 0,68 μ F (5), 1 μ F (5), 10 μ F (10), 15 μ F, 47 μ F, 100 μ F (2), 220 μ F, 330 μ F

En raison du faible coût des condensateurs céramiques de valeur inférieure à 10 μ F, une quantité minimale de 5 est suggérée dans cette liste.

Interrupteurs

- À bascule
- Tactile

LED

- 3 mm générique (10)

Potentiomètres ajustables

- 5K, 10K, 500K (4), 1M (3)

Transistors

- 2N2222 ou PN2222 (7)

Circuits intégrés

- 555 timer, de type ancien, bipolaire (7)
- LM339 comparateur (3)
- LM741 ampli-op (3)
- LM386 amplificateur de puissance

Capteurs

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche (3)
- Microphone électret, de type générique à deux fils (4)

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée (3)
- Buzzer 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA max.

Autres

- Pincettes crocodiles (2)
- Cordons de liaison avec pincettes crocodiles à chaque extrémité (3)
- Pièce de carton ondulé de 15 x 30 cm minimum (1 pièce)
- Colle blanche Elmer ou similaire (quantité minimale)
- LM7806 régulateur de tension
- UA78M33 régulateur de tension
- 1N4001 diode de redressement (2)
- Relais à verrouillage DS1E-SL2-DC3V ou similaire de type SPDT ou DPDT avec une bobine de 3 V DC, pouvoir de coupure de 2 A
- Réveil digital alimenté par deux piles de 1,5 V

Éléments optionnels

- Eau distillée ou désionisée
- Sel de table

Matériel recommandé pour les expériences 15 à 25

Cette liste est entièrement indépendante et ne requiert pas de composants achetés précédemment pour les expériences 1 à 14.

Alimentation

- Pile de 9V et son connecteur
- Une alimentation 5 V DC, nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :
 - LM7805 régulateur de tension
 - Résistance de 2K2
 - Condensateurs de 0,33 μ F et 0,1 μ F
 - Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
 - LED générique de 3 mm

Résistances

- 100 Ω (15), 220 Ω (15), 330 Ω (10), 470 Ω (15), 1K (5), 3K3, 4K7, 10K (20), 33K (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- 0,001 μ F (5), 0,01 μ F (5), 0,1 μ F (5), 100 μ F

Les condensateurs céramiques de valeurs inférieures à 10 μ F étant peu coûteux, une quantité minimale de 5 est suggérée dans cette liste.

Interrupteurs

- Tactile (10)
- Poussoir DPDT (4)
- Poussoir 4PDT (12)
- Capuchon de poussoir (16)
- DIP 4-positions (2)
- DIP 8-positions (2)

LED

- 3 mm, avec résistance interne (35)

- 5 mm générique (10)

Potentiomètre ajustable

- 50K

Transistors

- 2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

- 555 timer de type ancien, bipolaire (3)
- 74HC08 quadruple AND à deux entrées (4)
- 74HC32 quadruple OR à deux entrées (2)
- 74HC02 quadruple NOR à deux entrées
- 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (4)
- 74HC4075 triple OR à trois entrées (2)
- 74HC4002 double NOR à quatre entrées
- 74HC11 triple AND à trois entrées
- 74HC4514 ou 4514B décodeur (2)
- 74HC237 décodeur (2)
- 4067B multiplexeur
- 4520B compteur
- 74HC148 encodeur (2)

Capteurs

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée
- Buzzer 9V DC ou 12V DC, 100 mA max (3)

Autres

Plaque perforée sans pistes de cuivre (1 pièce de 15 x 15 cm minimum)

Composants optionnels

- Câble ruban multicolore (60 cm environ)
- Poussoir 3PDT

- Poussoir DPDT (3)
- Poussoir SPDT (3)
- Capuchon pour poussoir (7)

Matériel recommandé pour les expériences 26 à 36

Cette liste est entièrement indépendante et ne nécessite pas de composants achetés précédemment pour les expériences 1 à 25.

Alimentation

- Pile de 9 V et son connecteur
- Une alimentation 5 V DC, nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :
 - LM7805 régulateur de tension
 - Résistance de 2K2
 - Condensateurs de 0,33 μ F et 0,1 μ F
 - Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
 - LED générique de 3 mm

Résistances

- 100 Ω (5), 220 Ω (50), 330 Ω (20), 470 Ω (5), 680 Ω (20), 1K (5), 3K3 (20), 4K7 (5), 10K (20), 100K (5), 1M (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- 47pF (5), 68pF (5), 0,0001 μ F (5), 0,001 μ F (5), 0,01 μ F (10), 0,033 μ F (5), 0,1 μ F (5), 0,33 μ F (5), 1 μ F (5), 2,2 μ F (5), 10 μ F (5), 100 μ F

En raison du faible coût des condensateurs céramiques de valeurs inférieures à 10 μ F, une quantité minimale de 5 est suggérée ici.

Interrupteurs

- Tactile (2)
- Poussoir DPDT (4)

- Capuchon pour poussoir (4)

LED

- 3 mm générique (40) ou (4) si des bargraphes (36) sont utilisés pour l'expérience 28
- 3 mm avec résistance interne (40)
- 5 mm générique (20)

Potentiomètres ajustables

- 1K, 2K, 100K

Transistors

- 2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

- 7555 timer (8)
- 74HC4017 compteur (3)
- 74HC08 quadruple AND à deux entrées (2)
- 74HC32 quadruple OR à deux entrées (2)
- 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (2)
- 74HC7266 quadruple XNOR à deux entrées (2)
- 4078B OR/NOR à huit entrées
- 4520B Compteur binaire (2)
- 74HC30 NAND à huit entrées
- 74HC164 registre à décalage (5)
- 74HC4514 ou 4514B décodeur
- 74HC4017 compteur
- ULN2003 réseau Darlington (2), ou (5), si les bargraphes sont utilisés dans l'expérience 28

Capteurs

- Interrupteur Reed SPST de n'importe quel type
- Capteur à effet Hall bipolaire ATS177 ou similaire (2), et capteur à effet Hall unipolaire, ou linéaire, ou omnipolaire (optionnel)
- Capteur à infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire
- Thermistance de 100K

- Encodeur rotatif Bourns ECW1J-B24-BC0024L ou similaire de 24 pas par rotation et 24 détentes, à sortie en quadrature (2)

Autres

- Fils de liaison flexibles (50)
- Petit aimant d'environ $7 \times 7 \times 40$ mm ou barre aimantée miniature en néodyme d'environ $7 \times 1,6 \times 13$ mm
- Lests en plomb (2) et fil étamé (environ 30 cm) selon description de l'expérience 33

Composants optionnels supplémentaires

- Câble ruban multicolore (60 cm environ)
- Barrettes de connexion mâles (33)
- Barrettes de connexion femelles (33)
- Bargraphes (36) et réseaux Darlington ULN2003 (3), si vous réalisez la version finale de l'expérience 28
- Bille magnétique, tube d'aluminium et aimants en anneau (4), selon description de l'expérience 29
- 330Ω (16), 680Ω (16), $3K3$ (16), LED 5 mm (16), capteur infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire (16) et réseau Darlington ULN2003 (3), si vous réalisez la version définitive de l'expérience 31
- Bille magnétique, tube aluminium et aimants en anneau (4), selon description de l'expérience 29

Matériel complet pour les expériences 1 à 14

Voir la section précédente « Composants génériques » page 306 pour les recommandations d'achat des composants génériques (résistances, condensateurs, LED, circuits intégrés logiques et les interrupteurs).

Dans les listes suivantes, toutes les quantités sont indiquées entre parenthèses. Si rien n'est mentionné, la quantité est égale à 1.

Alimentation

- Piles de 9 V et leurs connecteurs (8 max.)
- Adaptateur secteur fixe de 10 V DC à 12 V DC sous 1 A minimum

- Une alimentation 5 V DC, nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :

- LM7805 régulateur de tension
- Résistance de $2K2$
- Condensateurs de $0,33 \mu F$ 0,1 μF
- Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
- LED générique de 3 mm

Résistances

- 22Ω (5), 47Ω (5), 100Ω (5), 220Ω (5), 470Ω (10), $1K$ (15), $1K5$ (5), $2K2$ (10), $3K3$ (10), $4K7$ (10), $10K$ (20), $33K$ (5), $68K$ (10), $100K$ (40), $150K$ (5), $220K$ (5), $1M$ (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- $0,01 \mu F$ (10), $0,047 \mu F$ (5), $0,068 \mu F$ (5), $0,1 \mu F$ (5), $0,33 \mu F$ (5), $0,68 \mu F$ (10), $1 \mu F$ (10), $10 \mu F$ (15), $15 \mu F$ (2), $47 \mu F$ (3), $100 \mu F$ (4), $220 \mu F$ (2), $330 \mu F$ (3)

Les condensateurs céramiques de valeurs inférieures à $10 \mu F$ étant peu coûteux, une quantité minimale de 5 est suggérée dans cette liste.

Interrupteurs

- À bascule
- Tactile

LED

- 3 mm générique (10)

Potentiomètres ajustables

- $5K$, $10K$, $500K$ (4), $1M$ (3)

Transistors

- 2N2222 ou PN2222 (10)

Circuits intégrés

- 555 timer, de type ancien, bipolaire (10)
- LM339 comparateur (5)

- LM741 ampli-op (7)
- LM386 amplificateur de puissance

Capteurs

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche (5)
- Microphone électret, de type générique à deux fils (5)

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée (5)
- Buzzer 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA max.

Autres

- Pincés crocodiles (2)
- Cordons de liaison avec pincés crocodiles à chaque extrémité (3)
- Pièce de carton ondulé de 15 $\times$ 30 cm minimum (1 pièce)
- Colle blanche Elmer ou similaire (quantité minimale)
- LM7806 régulateur de tension
- UA78M33 régulateur de tension
- 1N4001 diode de redressement (2)
- Relais à verrouillage DS1E-SL2-DC3V ou similaire de type SPDT ou DPDT avec une bobine de 3 V DC, pouvoir de coupure de 2 A
- Réveil digital alimenté par deux piles de 1,5 V

Éléments optionnels supplémentaires

- Eau distillée ou désionisée
- Sel de table
- Transistor de remplacement
- Ampèremètre de calibre 50 mA
- Ampèremètre de calibre 10 mA

Matériel complet pour les expériences 15 à 25

Cette liste est entièrement indépendante et ne requiert pas de composants achetés précédemment pour les expériences 1 à 14.

Alimentation

- Piles de 9 V et leurs connecteurs (5 max.)
- Une alimentation 5 V DC, nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :
 - LM7805 régulateur de tension
 - Résistance de 2K Ω
 - Condensateurs de 0,33 μ F et 0,1 μ F
 - Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
 - LED générique de 3 mm

Résistances

- 100 Ω (20), 220 Ω (40), 330 Ω (10), 470 Ω (15), 1K (5), 3K3 (5), 4K7 (5), 10K (60), 33K (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- 0,001 μ F (5), 0,01 μ F (5), 0,1 μ F (5), 100 μ F (2)

Les condensateurs céramiques de valeurs inférieures à 10 μ F étant peu coûteux, une quantité minimale de 5 est suggérée dans cette liste.

Interrupteurs

- Tactile (16)
- Poussoir DPDT (4)
- Poussoir 4PDT (18)
- Poussoir 6PDT (2)
- Capuchon pour poussoir (25)
- DIP 4-positions (3)
- DIP 8-positions (4)

LED

- 3 mm générique (10)
- 3 mm avec résistance incorporée (50)
- 5 mm générique (15)

Potentiomètre ajustable

- 50K

Transistors

- 2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

- 555 timer type ancien, bipolaire (3)
- 74HC08 quadruple AND à deux entrées (8)
- 74HC32 quadruple OR à deux entrées (4)
- 74HC02 quadruple NOR à deux entrées (2)
- 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (6)
- 74HC4075 triple OR à trois entrées (3)
- 74HC4002 double NOR à quatre entrées (2)
- 74HC11 triple AND à trois entrées (2)
- 74HC4514 ou 4514B décodeur (3)
- 74HC237 décodeur (3)
- 4067B multiplexeur (2)
- 4520B compteur (2)
- 74HC148 encodeur (3)

Capteur

- Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Reproducteurs sonores

- Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée
- Buzzer 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA max. (3)

Autres

Plaque perforée sans pistes de cuivre (1 pièce de 15 x 15 cm minimum)

Éléments optionnels supplémentaires

- Câble ruban multicolore (60 cm environ)
- Poussoir 3PDT
- Poussoir DPDT (3)
- Poussoir SPDT (3)
- Capuchon pour poussoir (7)

Matériel complet pour les expériences 26 à 36

Cette liste est entièrement indépendante et ne requiert pas de composants achetés précédemment pour les expériences 1 à 25.

Alimentation

- Piles de 9 V et leurs connecteurs (3 max.)
- Une alimentation 5 V DC nécessitant les composants suivants (multiplier par le nombre de projets pour lesquels vous souhaitez utiliser une alimentation séparée) :
 - LM7805 régulateur de tension
 - Résistance de 2K2
 - Condensateurs de 0,33 μ F et 0,1 μ F
 - Interrupteur à bascule SPST ou SPDT
 - LED générique de 3 mm

Résistances

- 100 Ω (5), 220 Ω (70), 330 Ω (20), 470 Ω (5), 680 Ω (20), 1K (5), 3K3 (20), 4K7 (5), 10K (25), 100K (10), 1M (5)

Les résistances étant peu coûteuses, une quantité minimale de 5 est conseillée dans cette liste.

Condensateurs

- 47pF (5), 68pF (5), 0,0001 μ F (5), 0,001 μ F (5), 0,01 μ F (15), 0,033 μ F (10), 0,1 μ F (5), 0,33 μ F (5), 1 μ F (5), 2,2 μ F (5), 10 μ F (5), 100 μ F (3)

Les condensateurs céramiques de valeurs inférieures à 10 μ F étant peu coûteux, une quantité minimale de 5 est suggérée dans cette liste.

Interrupteurs

- Tactile (4)
- Poussoir DPDT (7)
- Capuchon pour poussoir (7)

LED

- 3 mm générique (40) ou (4) si des bargraphes (36) sont utilisés pour l'expérience 28
- 3 mm avec résistance intégrée (60)
- 5 mm générique (20)

Potentiomètres ajustables

- 1K, 2K, 100K

Transistors

- 2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

- 7555 timer (11)
- 74HC4017 compteur (3)
- 74HC08 quadruple AND à deux entrées (2)
- 74HC32 quadruple OR à deux entrées (2)
- 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (3)
- 74HC7266 quadruple XNOR à deux entrées (2)
- 74HC30 NAND à huit entrées
- 4078B OR/NOR à huit entrées
- 4520B compteur binaire (2)
- 74HC164 registre à décalage (6)
- 74HC4017 compteur (3)
- 74HC4514 ou 4514B décodeur
- ULN2003 réseau Darlington (2) ou (5), si des bargraphes sont utilisés pour l'expérience 28

Capteurs

- Interrupteur Reed SPST de n'importe quel type (2)
- Capteur à effet Hall bipolaire ATS177 ou similaire (2), et capteur à effet Hall unipolaire ou linéaire ou omnipolaire (optionnel)

- Capteur à infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire (20)
- Thermistance de 100K (2)
- Encodeur rotatif Bourns ECW1J-B24-BC0024L ou similaire de 24 pas par rotation et 24 détentés, à sortie en quadrature (3)

Autres

- Fils de liaison flexibles (50)
- Petit aimant d'environ $7 \times 7 \times 40$ mm (2), ou barre aimantée miniature en néodyme d'environ $7 \times 1,6 \times 13$ mm (2)
- Lests en plomb (2) et fil étamé (environ 30 cm) selon description de l'expérience 33

Éléments optionnels supplémentaires

- 3300 Ω (16), 6800 Ω (16), 3K3 (16), LED 5 mm (16), capteur à infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire (16), et ULN2003 réseau Darlington (3), si des bargraphes sont utilisés pour l'expérience 31
- Câble ruban multicolore (environ 60 cm)
- Barrette de connexion mâle (40) et barrette de connexion femelle (40)
- Bargraphes (36) et ULN2003 réseau Darlington (3) si vous réalisez la version définitive de l'expérience 28
- Bille magnétique, tube aluminium et aimants en anneau (4), selon description de l'expérience 29

Matériel pour chaque expérience

Voir la section « Composants génériques » page 306, pour les recommandations d'achat des composants génériques comprenant les résistances, les condensateurs, les LED, les circuits intégrés logiques et les interrupteurs.

Les listes qui suivent précisent la quantité exacte de chaque composant nécessaire pour chaque expérience.

Toutes les quantités sont indiquées entre parenthèses. Si rien n'est mentionné, la quantité est égale à 1.

Expérience 1

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistance

470 Ω

Transistor

2N2222 ou PN2222

LED

De n'importe quel type

Autres

- Pincettes crocodiles (2)
- Cordons de liaison avec pincettes crocodiles à chaque extrémité (3)
- Pièce de carton ondulé de 15 × 30 cm minimum (1 pièce)
- Colle blanche Elmer ou similaire (quantité minimale)

Éléments additionnels optionnels

Eau distillée ou désionisée, sel de table, transistor de rechange

Expérience 2

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

220 Ω , 470 Ω (5), 1 K, 1 K5

Potentiomètre ajustable

1 M

Transistor

2N2222 ou PN2222

Expérience 3

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

100 Ω , 3 K3, 10 K, 33 K

Condensateurs

0,01 μ F, 10 μ F

Circuit intégré

555 timer de type ancien, bipolaire

Capteur

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Reproducteur sonore

Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée

Expérience 4

Alimentation

5 V DC régulée

Résistance

3 K3

Capteur

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Expérience 5

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

100 Ω , 3 K3, 10 K (2), 33 K, 150 K

Condensateurs

0,01 μ F, 1 μ F, 10 μ F (2), 47 μ F

Circuit intégré

555 timer de type ancien, bipolaire (2)

Capteur

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Reproducteur sonore

Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée

Expérience 6

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

470 Ω , 3K3, 100K

LED

3 mm générique

Potentiomètres ajustables

500K (2)

Circuit intégré

LM339 comparateur

Capteur

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Expérience 7

Alimentation

Pile de 9V et son connecteur pour le test du circuit, pile de 1,5V pour le réveil (2), adaptateur secteur de 10 V DC à 12 V DC pour l'utilisation prolongée

Résistances

47 Ω , 220 Ω (2), 1K (2), 3K3, 10K (4), 100K (2), 220K (2), 1M (2)

Condensateurs

0,01 μ F (2), 0,1 μ F (2), 0,33 μ F (2), 1 μ F (5), 100 μ F

Interrupteur

Tactile

LED

3 mm générique (2)

Potentiomètres ajustables

500K (2)

Transistors

2N2222 ou PN2222 (2)

Circuits intégrés

LM339 comparateur, 555 timer de type ancien, bipolaire (2)

Capteur

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche

Autres

LM7806 régulateur de tension, UA78M33 régulateur de tension, 1N4001 diode de redressement (2), relais à verrouillage DS1E-SL2-DC3V ou similaire de type SPDT ou DPDT, avec bobine de 3 V et de capacité de coupure 2 A, réveil digital alimenté par deux piles de 1,5 V (voir l'expérience pour les détails)

Expérience 8

Alimentation

Pile de 9V et son connecteur

Résistance

4K7

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Expérience 9

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

4K7, 100K (10)

Condensateurs

0,68 μ F (2)

Circuit intégré

LM741 amplificateur opérationnel

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Expérience 10

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

470 Ω , 1K (2), 4K7, 10K, 100K (10)

Condensateurs

0,68 μ F (2)

LED

3 mm générique

Transistor

2N2222 ou PN2222

Circuit intégré

LM741 amplificateur opérationnel

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Expérience 11

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

2,2K (10), 68K (2), 10K, 100K (10), 220K, 1M

Condensateurs

1 μ F, 10 μ F (2)

Potentiomètre ajustable

5K

Circuit intégré

LM741 amplificateur opérationnel

Expérience 12

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

22 Ω , 100 Ω , 1K, 3K3, 4K7, 10K, 68K (2), 100K, 150K

Condensateurs

0,047 μ F, 0,1 μ F, 0,68 μ F, 10 μ F (2), 330 μ F

Potentiomètre ajustable

10K

Circuits intégrés

LM741 amplificateur opérationnel, LM386 amplificateur de puissance

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Reproducteur sonore

Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée

Expérience 13

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

100 Ω , 1K (2), 3K3, 4K7, 10K (4), 33K, 68K (2)

Condensateurs

0,01 μ F, 0,068 μ F, 0,68 μ F, 10 μ F (3), 47 μ F, 100 μ F, 330 μ F

Potentiomètre ajustable

1M

Transistor

2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

LM741 amplificateur opérationnel, 555 timer de type ancien, bipolaire

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Reproducteur sonore

Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée

Expérience 14

Alimentation

Pile de 9V et son connecteur

Résistances

220 Ω (2), 470 Ω , 1K (3), 3K3, 4K7 (2), 10K (4), 68K (2), 100K, 150K (2)

Condensateurs

0,01 μ F (2), 0,1 μ F, 0,68 μ F, 10 μ F (3), 15 μ F, 100 μ F, 220 μ F

LED

3 mm générique (2)

Potentiomètre ajustable

1M

Transistors

2N2222 ou PN2222 (2)

Circuits intégrés

LM741 amplificateur opérationnel, 555 timer de type ancien, bipolaire (2)

Capteur

Microphone électret générique à deux fils

Reproducteur sonore

Buzzer actif de 9 V DC ou 12 V DC, 100 mA max

Expérience 15

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

220 Ω , 10K (4)

Interrupteurs

Tactile (4)

LED

3 mm générique

Circuits intégrés

74HC08 quadruple AND à deux entrées, 74HC32 quadruple OR à deux entrées

Expérience 16

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (4), et 220 Ω (6) si requises pour les LED

LED

3 mm avec résistance incorporée pour le test, sinon ajouter les résistances indiquées ci-dessus, ou 5 mm pour la version finale (6)

Circuits intégrés

74HC08 quadruple AND à deux entrées, 74HC86 quadruple XOR à deux entrées (2), 74HC11 triple AND à trois entrées, 74HC02 quadruple NOR à deux entrées

Interrupteurs

Tactile (4)

Expérience 17

Aucun composant n'est nécessaire.

Expérience 18

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

100 Ω (6), 220 Ω (6), 470 Ω (2), 330 Ω (6)

Interrupteurs

Bouton-poussoir 4PDT (6) avec capuchons (6)

LED

5 mm avec résistance incorporée (8), ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Reproducteur sonore

Buzzer actif de 9 V DC ou 12 V DC (3)

Autres

Plaque perforée sans pistes de cuivre (1 pièce de 15 $\times$ 15 cm minimum), câble ruban multicolore (environ 60 cm) en option

Expérience 19

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (4), et 220 Ω (7) si requises pour les LED

Interrupteurs

Tactile (4), DIP 4-positions

LED

3 mm avec résistance incorporée (7), ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

74HC4514 ou 4514B décodeur, 74HC32 quadruple OR à deux entrées, 74HC4075 triple OR à trois entrées

Expérience 20

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (6), et 100 Ω (10), 220 Ω (10) si requises pour les LED

Interrupteurs

Bouton-poussoir 4PDT (6) avec capuchons (6)

LED

3 mm avec résistance incorporée (10) ou générique (10), avec les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

74HC237 décodeur (2), 74HC08 quadruple AND à deux entrées (2), 74HC4075 triple OR à trois entrées, 74HC4002 double NOR à quatre entrées

Expérience 21

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistances

470 Ω , 1K, 10K (8)

Condensateurs

0,001 μ F, 0,01 μ F, 0,1 μ F, 100 μ F

Potentiomètre ajustable

1K

Interrupteurs

Tactile (4), bouton-poussoir DPDT, à levier, DIP 8-positions (2)

LED

3 mm avec résistance incorporée, ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

4067B multiplexeur, 4520B compteur, 555 timer de type ancien, bipolaire

Expérience 22

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

100, 1K, 3K3 (2), 4K7, 10K (4), 33K

Condensateurs

0,01 μ F (2)

Potentiomètre ajustable

50K

Transistor

2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

555 timer de type ancien, bipolaire (2), 74HC86 quadruple XOR à deux entrées

Capteurs

Phototransistor PT334-6C ou similaire, réagissant à la lumière blanche (2)

Reproducteur sonore

Haut-parleur de 5 cm de diamètre, impédance 50 Ω ou plus élevée

Expérience 23

Alimentation

Pile de 9 V DC et son connecteur

Résistances

470 Ω (7) si requises pour les LED

Interrupteurs

Bouton-poussoir 4PDT (6)

LED

3 mm avec résistance incorporée (7), ou ajouter les résistances indiquées précédemment

Expérience 24

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (6), et 220 Ω (4) si requises pour les LED

Interrupteurs

DIP 4-positions (2)

LED

3 mm avec résistance incorporée (4), ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

74HC86 quadruple XOR à deux entrées (2), 74HC08 quadruple AND à deux entrées (2), 74HC32 quadruple OR à deux entrées

Expérience 25

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (19), et 220 Ω (4) si requises pour les LED

Interrupteurs

Bouton-poussoir 6PDT (2), DIP 8-positions (2)

LED

3 mm avec résistance incorporée (18), ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

74HC4514 décodeur, 74HC148 encodeur (2)

Éléments additionnels optionnels

Bouton-poussoir 3PDT, bouton-poussoir DPDT (3),
bouton-poussoir SPDT (3)

Expérience 26*Alimentation*

5 V DC régulée

Résistances

10K (4), 100K, et 220 Ω (3) si requises pour les LED

Condensateurs

0,01 μ F (2), 0,033 μ F, 0,1 μ F (2), 1 μ F (2)

Interrupteurs

Bouton-poussoir DPDT, et tactile

LED

3 mm avec résistance incorporée (30) ou ajouter les résistances indiquées ci-dessus

Potentiomètre ajustable

100K

Circuits intégrés

7555 timer (2), 74HC4017 compteur (3), 74HC08 quadruple AND à deux entrées

Autres

Câble ruban multicolore optionnel (environ 60 cm),
broche de connexion mâle sur barrette (33), broche de
connexion femelle sur barrette (33), ou utiliser des fils
de pontage flexibles (33)

Expérience 27*Alimentation*

5 V DC régulée

Résistances

10K (2), 100K, et 220 Ω (9) si requises pour les LED

Condensateurs

0,01 μ F, 0,033 μ F, 0,1 μ F, 2,2 μ F

Interrupteurs

Bouton-poussoir DPDT, et tactile

LED

3 mm avec résistance incorporée (9) ou ajouter les résistances indiquées précédemment

Circuits intégrés

7555 timer, 74HC164 registre à décalage

Expérience 28*Alimentation*

5 V DC régulée

Résistances

220 Ω (24), 3K3, 4K7, 10K (3), 1M

Condensateurs

0,001 μ F, 0,033 μ F, 0,01 μ F (2), 0,1 μ F (2), 0,33 μ F, 33 μ F,
100 μ F

Interrupteur

Tactile

LED

3 mm générique pour vérifier le fonctionnement (36),
ou bargraphes (36) comme indiqué dans l'expérience

Transistor

2N2222 ou PN2222

Circuits intégrés

7555 timer (2), 74HC164 registre à décalage (3),
74HC4514 ou 4514B décodeur, 4078B OR/NOR à huit
entrées, 4520B compteur binaire, en option, ULN2003
réseau Darlington (3) si des bargraphes sont utilisés

Expérience 29

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistance

470 Ω

LED

3 mm générique

Capteur

Interrupteur Reed SPST, de n'importe quel type

Autres

Petit aimant d'environ $7 \times 7 \times 40$ mm ou barre aimantée miniature en néodyme d'environ $7 \times 1,6 \times 13$ mm, en option aimants en forme d'anneau, bille magnétique et tube en aluminium, comme décrits dans l'expérience

Expérience 30

Alimentation

Pile de 9 V et son connecteur

Résistance

1 K

LED

3 mm générique

Capteurs

Capteur à effet Hall bipolaire ATS177 ou similaire (2), et capteur à effet Hall unipolaire ou linéaire ou omnipolaire (optionnel)

Autre

Petit aimant d'environ $7 \times 7 \times 40$ mm ou barre aimantée miniature en néodyme d'environ $7 \times 1,6 \times 13$ mm (2)

Expérience 31

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

100 Ω , 220 Ω , 1 K pour la version de démonstration, ou 330 Ω (16), 680 Ω (16), 3 K3 (16) pour une réalisation définitive

LED

5 mm pour la version de démonstration, ou 5 mm générique (16) pour la version définitive

Potentiomètres ajustables

1 K, 2 K

Circuits intégrés

74HC32 quadruple OR à deux entrées, et ULN2003 réseau Darlington (2) pour la version définitive

Capteurs

Capteur à infrarouge transmissif Everlight ITR9606 ou similaire. (1) pour la version de démonstration, (16) pour la version définitive

Autres

Fils de liaison flexibles, avec embouts aux deux extrémités (9)

Expérience 32

Aucun composant n'est nécessaire.

En option, interrupteurs Reed SPST additionnels (18) et leurs aimants de commande

Expérience 33

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

220 Ω (2), 470 Ω (2), 10 K (4)

Interrupteur

Tactile

LED

3 mm générique (3)

Circuits intégrés

74HC86 quadruple XOR à deux entrées

Capteurs

Encodeur rotatif Bourns ECW1J-B24-BC0024L ou similaire de 24 pas par rotation et 24 détentes, à sortie en quadrature (2)

Autres

Lests en plomb (2) et fil étamé (environ 30 cm) selon description de l'expérience 33

Expérience 34

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (4), 100K (2), et 220 Ω (9) si requises pour les LED

Condensateurs

0,0001 μ F, 0,01 μ F (2), 0,033 μ F, 1 μ F, 10 μ F

Interrupteur

Bouton-poussoir DPDT

LED

3 mm avec résistance incorporée (9), ou génériques avec les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

7555 timer (2), 74HC4017 compteur

Capteur

Thermistance 100K

Expérience 35

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K, 100K, et 220 Ω (9) si requises pour les LED

Condensateurs

0,01 μ F, 0,033 μ F, 0,1 μ F, 2,2 μ F, 100 μ F

Interrupteur

Bouton-poussoir DPDT

LED

3 mm avec résistance incorporée (9), ou génériques avec les résistances indiquées précédemment

Circuits intégrés

7555 timer, 74HC164 registre à décalage, 74HC86 quadruple XOR à deux entrées, 74HC7266 quadruple XNOR à deux entrées

Expérience 36

Alimentation

5 V DC régulée

Résistances

10K (5), 100K (2), et 220 Ω (8) si requises pour les LED

Condensateurs

47pF, 68pF, 100pF, 0,01 μ F (4), 10 μ F (2), 100 μ F

Interrupteurs

Bouton-poussoir DPDT (3)

LED

3 mm avec résistance incorporée (4), ou génériques avec les résistances indiquées ci-dessus

Circuits intégrés

7555 timer (3), 74HC164 registre à décalage, 74HC86 quadruple XOR à deux entrées, 74HC7266 quadruple XNOR à deux entrées, 74HC30 NAND à huit entrées, 74HC08 quadruple AND à deux entrées, 74HC32 quadruple OR à deux entrées

Symboles

2N222, problèmes
 brochages non standards 11
 5 V DC régulés 1
 74HC00, famille logique 114
 74HC02, circuit 123
 74HC08, circuit 115
 74HC11, circuit 123
 74HC32, circuit 115
 74HC86, circuit 123
 74HC148, circuit 192
 74HC164, circuit 210
 74HC221, temporisateur 34
 74HC237, circuit 157
 74HC4002, circuit 156
 74HC4017, compteur 200
 74HC4075, circuit 149
 74HC4078, circuit 218
 74HC4514, circuit 145, 191
 74HC5555, timer 34
 74HC7266, circuit 282
 220 V AC, précautions 58
 555, temporisateur 28, 33
 avec contestataire de bruit 105
 avec une thermistance 268
 circuit astable 29
 circuit monostable 28
 circuits CMOS et bipolaires 31
 commandé par un autre 267
 comparaison avec le 7555 199
 durée de l'impulsion monostable 29
 fréquence de sortie 30
 générer des valeurs aléatoires 267
 jeu de la fente magique 167
 son de sirène 33

555, temporisateur brochage 24
 4026B, compteur décimal 241
 4047B, timer 34
 4067B, circuit 163
 4078B, circuit 218
 4520B, compteur 166
 4528B, timer 34
 7555, timer 34

A

achat de composants en ligne 305
 additionneur à 3 digits 187
 avec entrées décimales 192
 avec sorties décimales 191
 additionneur à interrupteurs 195
 aimant
 au néodyme 230
 pôle magnétique 230
 courants de Foucault 232
 dangers 233
 magnétisé axialement 232
 magnétisé radialement 232
 polarité 230
 polarité axiale 230
 alimentation
 de secours 59
 diviseur de tension 65
 électrique
 problème avec l'ampli-op 101
 régulation 1
 simple avec un ampli-op 88
 symétrique 64, 86
 amplificateur
 circuit 92
 dysfonctionnement 93

LM386 91
 amplificateur opérationnel 89
 calcul du gain 84
 diviseur de tension 68
 en bref 89
 entrée inverseuse 69
 entrée non inverseuse 69
 LM741 68
 tension de référence 68
 une seule alimentation 88
 amplification
 en courant continu
 par un ampli-op 75
 graphique 77
 mesures avec un transistor 17
 ampli-op 75, 80, 87
 causes probables 74
 circuits de base 86
 contre-réaction négative 77
 écrêtage 81
 entrée inverseuse 87
 entrée non inverseuse 87
 gain 71
 LED activée par un bruit 73
 mesure de sortie 71
 origines 80
 préamplificateur 91
 présentation 61
 problème de puissance 101
 amplitude d'un signal audio 75
 audio
 amplitude d'un signal 75
 circuit amplificateur complet 92
 circuit logique 173
 condensateur de liaison 67
 contre-réaction négative 77

distorsion 80, 93
écrêtage 81
mesure du gain 82
ondes de pression 64

B

barre lumineuse 215
barrette de connexion 201
bascule 207
brochage

74HC02 123
74HC08 115
74HC11 123
74HC32 115
74HC86 123
74HC148 193
74HC164 210
74HC237 156
74HC4002 156
74HC4017 200
74HC4075 149
74HC4078 218
74HC4514 150
74HC7266 282

4067B 163

4078B 218

4514 150

4520B 166

LM339 43

LM386 91

LM741 68

microphone électret 62

temporisateur 555 24

transistor NPN 11

ULN2003 218

brochage du 555 24

brochage non standard

P2N2222 11

buzzer

alarme de réveil 54

dans le circuit Pierre, Feuille,
Ciseaux 138

C

câblage 3
calibre de longueur de fil 4
couleur de fil 4
diamètre des fils 5

fil de liaison 4
calcul binaire
règles d'addition 183
calculs mathématiques VII
capteur à effet Hall 238
application 237
avec circuits logiques 239
bipolaire 235, 238
hystérésis 237
jeu de lancer de billes 239
linéaire 238
omnipolaire 239
test 235
unipolaire 238
capteur de lumière
actif 243
circuit intégré 247
courant de transmission 245
dégradation 245
émetteur-récepteur réflectif 244
émetteur-récepteur transmissif 244
interrupteur optique 244
jeu de la fente magique 248
jeu d'Ovide 255
tension de transmission 245
test 245

capteur de niveau 227

capteur de pression 274

capteur d'humidité 272

capteur tactile 273

cellule photoélectrique 23

cellule photovoltaïque 28

circuit AND

à trois entrées 122

quadruple à 2 entrées 114

circuit intégré

74HC4078, simple porte OR à huit
entrées 218

double porte NOR à quatre en-
trées 74HC4002 156

quatre portes NOR à deux entrées
123

testeur de télépathie 123

circuit intégré logique

achat 309

capteur à effet Hall 235

capteur de lumière 243

en bref 113

entrée flottante 114

famille HC 309

signaux audiophoniques 173
sortie 114
substitution 309
circuit intégré XNOR
quadruple porte à deux entrées
74HC7266 282
circuit OR
74HC4078, simple porte OR à huit
entrées 218
quatre portes à deux entrées
74HC32 114
triple OR à trois entrées, le
74HC4075 149
circuit XOR
quatre portes à deux entrées
74HC86 avec signal audio 122
clavier numérique matricé 195
codage binaire
additionneur complet 185
demi-additionneur 185
équivalents décimaux 148
ordinateurs 194
code ASCII 211
code binaire
addition avec circuits logiques 184
addition avec des portes NAND 186
additionneur à 3 digits 187
additionneur à 3 digits avec
entrées décimales 192
additionneur à 3 digits avec
sorties décimales 191
additionneur à interrupteurs 195
colle 9
comparateur
brochage du LM339 43
comparé à un microcontrôleur 44
contre-réaction positive 38
en bref 42
entrée non inverseuse 41
hystérésis 40
phototransistor 37
sortie à collecteur ouvert 41
symbole 41
compteur
4520B 166
binaire à 4 bits 4520B 166, 218
limitation du comptage 270
compteur avec sorties décodées
compteur en anneau 199
compteur binaire 166

- compteur décimal 199, 241
- compteur en anneau
 - brochage du 74HC4017 200
 - démonstration 199
 - durée d'allumage aléatoire 205
 - jeu 202
 - microcontrôleur 206
- condensateur
 - de filtrage 96
 - de liaison 67, 70, 294
 - comparateur 51
 - signal audiophonique 67
 - sortie de l'ampli-op 71
 - électrolytique 307
 - en céramique 307
 - quantités 307
 - valeurs 307
- conducteur et isolant 12
- contestataire de bruit 95
 - microcontrôleur 109
 - révisé 105
- contre-réaction négative 80
 - avec ampli-op 77
 - courbe 77
 - résistance de retour à la masse 77
 - son audiophonique 77
- contre-réaction positive 38
- contrôleur d'éclairage
 - chronophotonique 47
- convertir des données parallèles en série 210
- courant de Foucault 232

D

- déboguer un circuit
 - en cas de dysfonctionnement VII
- décalage
 - code ASCII 211
- décodeur
 - 4 bits 148
 - 74HC237 157
 - 74HC4514 145
 - et multiplexeur 165
 - pour sorties d'additionneur 191
 - test de télépathie 145
- démultiplexeur 164, 165
- détecteur PIR
 - passif 243
 - PIR 243

- diagramme logique
 - optimisation 121
 - Pierre, Feuille, Ciseaux 127
 - problème logique 126
 - schéma traditionnel 114
- dimension des composants VI
- dipswitch 310
 - avec additionneur binaire 192
- distorsion du son 80, 93
- diviseur de tension 25
 - alimentation symétrique 65
 - ampli-op 68
 - calculer les valeurs 18
 - phototransistor 25
 - transistor 99

E

- écrêtage d'un signal audio 81
- électret 61
 - circuit de test 63
 - connexion 61
 - symbole 62
- empirisme 274
- en bref 555 28
 - amplificateur opérationnel 89
 - capteur optique transmissif 248
 - capteurs à effet Hall 238
 - circuits logiques 113
 - comparateur 38, 42
 - compteur en anneau 201
 - interrupteurs magnétiques 228
 - LFSR 278
 - multiplexeurs 162
 - multiplexeurs-démultiplexeurs 165
 - phototransistor 28
 - registre à décalage 210
 - thermistance 271
 - transistors 21
- encodeur 193
 - 74HC148 193
 - additionneur binaire 192
 - application 193
 - avec interrupteurs 198
 - avec portes logiques 194
 - et multiplexeur 165
 - incrémental 259
 - mécanique 259
- encodeur rotatif 259

- décideur rotatif 262
- définition 259
- fonctionnement 260
- porte XOR 263
- PPR 259
- résolution 259
- sortie 261
- sortie aléatoire 263
- spécification 259
- utilisation 261
- énigme de la fenêtre de Dudeney 177, 182
 - déplacements de pions 177
- entrée flottante d'une porte
 - logique 114
- entrée inverseuse
 - ampli-op 68, 87
 - comparateur 41
- entrée non inverseuse
 - ampli-op 68
 - comparateur 41

F

- familles logiques 114
- fiche technique
 - abréviations pour les transistors 17
 - site de son fournisseur VI
- fil
 - calibre de longueur 4
 - de câblage de section V
 - épaisseur 5
 - pince à dénuder 4
- fil de pontage 201

G

- gain 79
 - avec contre-réaction négative 80
- calcul 79
 - calcul avec ampli-op 86
- définition 71
- et distorsion 81, 92
- graphique 84
- mesure 81
- galvanomètre 20
- générateur de nombres aléatoires 287

H

- hexagramme 213
 - logique 215
- hystérésis 40
 - avec capteur à effet Hall 237
 - avec un microcontrôleur 45
 - avec un thermostat 40
 - graphique 40
- installation
 - espace de travail 1
- intérieur d'un réveil 51
- interrupteur
 - additionneur binaire 195
 - à glissière 139, 158
 - à levier 310
 - bouton-poussoir 310
 - brochage du 4PDT
 - représentation en 3D du 4PDT 139
 - chronophotonique 47
 - allumer ou éteindre une lampe 47
 - construire un encodeur 197
 - DIP 310
 - dipswitch 192
 - inverseur 310
 - jeu d'Ovide 180
 - Pierre, Feuille, Ciseaux 134
 - porte logique 133
 - prévention de la tricherie 136
 - rebonds 207
 - tactile 310
- interrupteur de lumière 244
- interrupteur Reed 225
 - application 228
 - boîtier en plastique 226
 - en bref 228
 - exemple 225
 - fonctionnement 226
 - jauge de carburant 227
 - jeu d'Ovide 256
 - par rapport aux interrupteurs électroniques 229
 - symbole 226
 - test 226

J

- jauge de carburant 227
- jeu de la fente magique 161
 - avec capteur optique 248
 - avec un microcontrôleur 172
 - capteur 252
 - conception du jeu 165
 - diagramme logique 166
 - fabrication 169
 - gagnant 170
- jeu d'Ovide
 - capteur optique 256
 - codage matriciel 258
 - interrupteur 180
 - interrupteur Reed 256
 - introduction 177
 - jeton aimanté 257
 - logique 179
 - microcontrôleur 181

L

- LED
 - amplificateur opérationnel 73
 - à résistance incorporée 308
 - barre lumineuse 214
 - choix 308
 - en série 136
 - générique 308
 - résistances série 308
 - valeur 308
- LFSR (Linear Feedback Shift Register)
 - application 287
 - circuit de test 277
 - en bref 278
 - introduction 277
 - pondération 285
 - porte XNOR 280
 - porte XOR 286
 - répétitions 284
 - testeur de télépathie pour une seule personne 291

M

- machine à différences de Charles Babbage 198
- mesure de la lumière 27
- mesure des tensions 20

- microcontrôleur
 - contestataire de bruit 109
 - entrée du phototransistor 44
 - générer un nombre aléatoire 289
 - hystérésis 45
 - jeu de la fente magique 172
 - jeu d'Ovide 181, 258
 - jeu du compteur en anneau 206
 - portes logiques 126
 - registre à décalage 211
 - testeur de télépathie 296
- microphone 63
 - électret 64
 - tension 64
- mini grippe-fils 5
- multimètre 20
- multiplexeur
 - 4067B 161
 - analogique et digital 164, 165
 - applications 163
 - brochage du circuit intégré 4067B 163
 - contacteur rotatif 163
 - décodeur 165
 - démultiplexeur 164
 - en bref 162
 - encodeur 165
 - test du 4067B 161, 164
- multiplexeur-démultiplexeur en bref 165

N

- nombre aléatoire
 - conditions 277
 - entre 0 et 15 167
 - jeu de la fente magique 165
- LFSR 277
 - microcontrôleur 289
 - non-répétition de la séquence 280
 - pas tout à fait aléatoire 274
 - testeur de télépathie pour une seule personne 298
 - valeur de départ 286
- nombre au hasard
 - deux timers 267
 - encodeur rotatif 261
 - Yi Jing 216
- non-décideur rotationnel 263
- notation VII

O

ondes sonores 63
outillage V

P

paire assortie de résistances 69
pavé numérique
 encodage matriciel 195
perception extrasensorielle 111
photodiode 28
photorésistance 23
phototransistor 23, 47
 circuit de test 27
 circuit logique 28
 comparateur 37
 comportement 27
 Darlington 28
 différence 23
 marche-arrêt 37
 microcontrôleur 44
 polarité 24
 son 23
 symbole 23
 système de sécurité 45
 temporisateur 555 24
Pierre, Feuille, Ciseaux
 buzzer 138
 circuit n'utilisant que
 des interrupteurs 135
 décodeur 3 bits 155
 diagramme logique 128
 gaines isolantes 134
 interrupteur 158
 règles 127
 version finale 141
 version hybride 157
pince à dénuder 4
pince crocodile 6
plaque de montage
 achat 311
 erreurs de câblage VIII
 modèle 2
pliage d'un tube de plastique 240
polarisation directe d'un transistor 21
polarité magnétique 230
pôle magnétique 230
porte AND

entrées et sorties 112
jeu d'Ovide 179
pour addition binaire 184
porte logique
 avec encodeur 194
 avec interrupteurs 133
 microcontrôleur 126
 niveaux d'entrée et sortie 112
porte NAND
 additionneur 186
 avec capteur à effet Hall 239
 entrées et sorties 113
porte NOR 123
 description 120
 entrées et sorties 113
porte OR
 entrées et sorties 113
 jeu d'Ovide 179
 testeur de télépathie 117
porte XNOR
 câblage d'un éclairage
 domestique 133
 LFSR 280
porte XOR
 addition binaire 185
 description 120
 deux en série 294
 encodeur rotatif 263
 LFSR 278
 signaux audio 174
 sortie de LFSR 284
préamplificateur 91
probabilité 127
 de la table de Walker 300
processus de création
 d'un circuit 95

R

rebonds des contacts 207
région de coupure
 d'un transistor 21
registre à décalage
 74HC164 210
 application moderne 211
 convertisseur serie-parallèle 211
 décalage des bits 208
 démonstration 208
 microcontrôleur 211
 TPIC6C596 218

valeur aléatoire 278
règles d'addition en binaire 183
relais 50
relais bistable 49
réseau Darlington 218, 219
réseau de portes logiques 130
résistance
 colle 9, 10
 contre-réaction négative 77
 de rappel 114
 eau 12
 LED 308
 mesures précises 70
 notation VI
 paire 69
 quantités 307
 valeurs 306
 vérifications 7
résistance de l'eau 12
résistivité 12
Rhine, J.B. 111

S

schéma VI
sonnerie de réveil 54
sophisme du joueur 127
sorties BCD d'un compteur 202
source d'approvisionnement 305
source de tension symétrique 64
stockage
 composants 6
 condensateurs 6
 résistances 6
supprimer les rebonds 207
système de sécurité
 avec un phototransistor 45

T

temporisateur
 variantes 34
tension continue régulée 1
tension de référence
 d'un ampli-op 68
testeur de télépathie
 amélioré 117
 calcul des probabilités 299
 introduction 111
 microcontrôleur 296

- PES 111
- pour un seul joueur 291, 297
- réalisation sur plaque
 - de montage 124
- registre à décalage à rétroaction linéaire 292
- registre à décalage de puissance TPIC6C596 218
- version de démonstration simple 116
- version du décodeur 148
- théorie des jeux 128
- thérémine 173
- thermistance 268
 - en bref 271
- transistor
 - abréviations
 - et fiches techniques 16
 - bipolaire 9
 - comme un amplificateur 10
 - de façon erronée 12
 - inversion de tension 98
 - mesure de l'amplification 13
 - NPN 11
 - brochage 11
 - polarisation directe 21
 - problèmes du 2N2222 11
 - région de coupure 21
 - tension d'émetteur 17
 - valeur bêta 17, 21
 - zone active 21
- translation de tension 98
- transmission de données en série 211
- triangle de Pascal 300

V

- valeur bêta d'un transistor 17

W

- Walker, John 300
- Widlar, Bob 95

Y

- Yi Jing
 - pouvoir de prédiction 213
 - test 213

Z

- zone active d'un transistor 21